



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

**AKTUÁTOR ŘÍDICÍ PLOCHY LETOUNU - MODELOVÁNÍ A
ŘÍZENÍ**

AIRCRAFT FLIGHT CONTROLS ACTUATOR - MODELING AND CONTROL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bohumil Kolář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

BRNO 2020

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Automatizační a měřicí technika**

Ústav automatizace a měřicí techniky

Student: Bohumil Kolář

ID: 195591

Ročník: 3

Akademický rok: 2019/20

NÁZEV TÉMATU:

Aktuátor řídící plochy letounu - modelování a řízení

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte rešerši aktuátorů používaných pro ovládání jednotlivých ploch letadla.
2. Sestavte fyzikální model (rovnice) systému elektrického, či elektro-mechanického aktuátoru.
3. Realizujte a simulačně ověřte polohovou regulaci aktuátoru.
4. Navrhněte a sestavte vlastní řešení reálné soustavy aproximující chování elektro-mechanického aktuátoru.
5. Experimentálně ověřte polohovou regulaci aktuátoru při konstantním zátěžném momentu.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

ROSKAM, Jan. Airplane flight dynamics and automatic flight controls. DARcorporation, 1998.

Termín zadání: 3.2.2020

Termín odevzdání: 8.6.2020

Vedoucí práce: Ing. Lukáš Pohl, Ph.D.

doc. Ing. Václav Jirsík, CSc.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Cílem této bakalářské práce je sestavení a řízení modelu aktuátoru, který aproximuje chování reálného aktuátoru při zátěži. Práce popisuje jednotlivé typy aktuátorů a jejich vlastnosti. Dále je popsán matematický model aktuátoru. Tento model se skládá z motoru a zátěže. Matematický model je aplikován v prostředí Simulink, kde byla navrhována a přidána regulační struktura. Práce popisuje i stavbu reálného aktuátoru a následně jeho testování v prostředí ControlDesk. Jednotlivé výsledky testování jsou v podobě přechodových charakteristik.

Klíčová slova

Aktuátor, BLDC, řízení, křídlo, Simulink, model, regulace, struktura servomechanismu, přechodová charakteristika

Abstract

The aim of this bachelor thesis is to compile and control the actuator model, which approximates the behavior of a real actuator under load. The work describes individual types of actuators and their properties. The mathematical model of the actuator is also described. This model consists of a motor and a load. The mathematical model is applied in the Simulink environment where a control structure was designed and added. The work also describes the construction of the real actuator and its subsequent testing in the ControlDesk. The results of the individual test are in the form of step responses.

Keywords

Actuator, BLDC, controll, wing, Simulink, model, regulation, servomechanism structure, step response

Bibliografická citace:

KOLÁŘ, Bohumil. *Aktuátor Řídicí Plochy Letounu - Modelování a Řízení* [online]. Brno, 2020 [cit. 2020-06-04]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/122926>. Semestrální práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav automatizace a měřicí techniky. Vedoucí práce Lukáš Pohl.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Aktuátor Řídicí Plochy Letounu - Modelování a Řízení jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce. Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

V Brně dne: **4. června 2019**

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Lukáši Pohlovi, Ph.D. za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **4. června 2019**

.....
podpis autora

OBSAH

1. Úvod.....	8
2. Přehled typů aktuátorů v letectví.....	9
2.1. EHA.....	9
2.2. EMA.....	11
2.3. Přehled běžných aplikací aktuátorů	12
2.4. Popis jednotlivých součástí EMA	12
2.4.1. BLDC motor.....	13
2.4.1.1. Princip činnosti BLDC	14
2.4.1.2. Určení polohy rotoru.....	14
2.4.1.3. komutace a řízení BLDC motoru.....	16
2.4.2. Kuličkový šroub	18
2.4.3. Mechanická redukce.....	18
3. matematický model EMA.....	19
3.1. Matematický model BLDC.....	19
3.2. Vztahy pro kuličkový šroub	23
3.3. Vztahy pro mechanickou redukci	24
3.4. Model zátěže aktuátoru	25
4. regulační struktura kompenzující poruchové signály působící na plochy letadla	26
4.1. schéma rozvětvené struktury servomechanismu	26
4.2. rozvětvená struktura aplikovaná v Simulinku.....	28
4.3. simulační ověření funkčnosti regulace.....	30
5. realizace aktuátoru	36
5.1. Řízení za pomoci ControlDesku a dSPACE	37
5.2. Data naměřená na reálném modelu aktuátoru.....	40
6. závěr	45
Literatura	47

Seznam obrázků

OBRÁZEK 1: MODEL EMA.....	11
OBRÁZEK 2: EMA	11
OBRÁZEK 3: ROZLOŽENÝ BLDC MOTOR.....	13
OBRÁZEK 4: BLDC MOTOR.....	13
OBRÁZEK 5: KOMUTACE	14
OBRÁZEK 6: INKREMENTÁLNÍ A ABSOLUTNÍ DISK ENKODÉRU	15
OBRÁZEK 7: BIPOLÁRNÍ SPÍNÁNÍ.....	16
OBRÁZEK 8: SCHÉMATICKÝ NÁKRES MOTORU SE STŘÍDAČEM.....	16
OBRÁZEK 9: UNIPOLÁRNÍ SPÍNÁNÍ.....	16
OBRÁZEK 10: KULIČKOVÝ ŠROUB	18
OBRÁZEK 11: MODEL KULIČKOVÉHO ŠROUBU.....	18
OBRÁZEK 12: SCHÉMA ROZVĚTVENÉ STRUKTURY SERVOMECHANISMU.....	26
OBRÁZEK 13: KLASICKÁ STRUKTURA ZPĚTNOVAZEBNÍHO ŘÍZENÍ	26
OBRÁZEK 14: SCHÉMA VINUTÍ MOTORU.....	27
OBRÁZEK 15: SCHÉMA ROZVĚTVENÉ STRUKTURY SERVOMECHANISMU APLIKOVANÉ V SIMULINKU	28
OBRÁZEK 16: MODEL FOC TRANSFORMACÍ SE SUBSYSTÉMEM MOTORU	28
OBRÁZEK 17: MODEL MOTORU	29
OBRÁZEK 18: MODEL ZÁTĚŽE	29
OBRÁZEK 19: FYZICKÝ MODEL SESTROJENÉHO EMA	36
OBRÁZEK 20: MODEL 3D TISKNUTÉ CENTRÁLNÍ ČÁSTI	36
OBRÁZEK 21: SESTAVENÝ SYSTÉM SIMULUJÍCÍ CHOVÁNÍ EMA.....	37
OBRÁZEK 22: MODEL VUT ALIGNMENT	37
OBRÁZEK 23: MODEL VUT REGULAČNÍ SCHÉMA	38
OBRÁZEK 24: VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ CONTROLDESK	39

Seznam tabulek

TABULKA 1: VYUŽITÍ AKTUÁTORŮ	12
TABULKA 2: ODVOZENÉ ROVNICE POPISUJÍCÍ CHOVÁNÍ MOTORU.....	23

Seznam grafů

GRAF: 1 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA POLOHY MATICE	30
GRAF: 2 RYCHLOST MATICE V ČASE	31
GRAF: 3 ZRYCHLENÍ MATICE V ČASE.....	32
GRAF: 4 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA RYCHLOSTI ROTORU	33
GRAF: 5 ÚHLOVÁ RYCHLOST ROTORU V ČASE	34
GRAF: 6 HODNOTY DQ SLOŽEK V ČASE	35
GRAF: 7 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA POLOHY ROTORU	40
GRAF: 8 PŘECHODOVÁ CHARAKTERISTIKA POLOHY ROTORU NA MALÉM ROZSAHU	41
GRAF: 9 REÁLNÁ RYCHLOST ROTORU V ČASE	42
GRAF: 10 REÁLNÁ RYCHLOST ROTORU V ČASE NA MALÉM ROZSAHU	43
GRAF: 11 HODNOTY DQ SLOŽEK V ČASE	44

1.ÚVOD

Letecký průmysl stále prochází modernizací a zaváděním nových technologií. Jedním z trendů je aplikace aktuátorů i do menších typů letounů. Aktuátory zajišťují přesnější a snadnější možnosti kontroly nad letounem, než při použití standardního pákového mechanismu táhel a lanoví.

Cílem této bakalářské práce bylo seznámit se s různými typy aktuátorů a jejich možnými variantami. Dále bylo třeba seznámit se s jejich stavbou a funkcí. Pozdější kapitoly popisují stavbu a seřízení aktuátoru.

První část práce je spíše teoretická, zabývá se teorií a stavbou bezkartáčových stejnosměrných elektromotorů. Chování motorů je shrnuto v matematickém modelu, který je aplikován v prostředí Simulink. Pro řízení polohy rotoru motoru, bylo třeba navrhnout regulační strukturu. Tyto struktury byly testovány v Simulinku a výsledky byly čistě teoretické.

Druhá část se zabývá stavbou aktuátoru, pro možnost ověření teoretických poznatků. Po sestavení aktuátoru, bylo možné tento systém připojit k vývojovému prostředí ControlDesk, kde bylo možné ověřit chování aktuátoru. Chování matematického modelu se shodovalo s chováním reálného aktuátoru.

Stavba, následné seřízení a rozpohybování aktuátoru dopadlo úspěšně. Proběhlo testování se zátěží v podobě gumové pružiny se zdárným výsledkem.

2. PŘEHLED TYPŮ AKTUÁROTŮ V LETECTVÍ

Aktuátor je součást avioniky letounu, která slouží především k ovládání klapek. V letectví se vyskytují převážně dva typy aktuátorů. Aktuátor elektro-hydraulický (EHA) a elektro-mechanický (EMA). Oba tyto typy jsou ovládány elektromotorem. Lineární pohyb u EHA zajišťuje elektromotor, který stlačuje hydraulickou kapalinu, a ta zapříčiní posun pístu. EMA využívá otočného mechanismu, který převádí torzní sílu na lineární. Tyto aktuátory ovládají primární (křídélka, výškové kormidlo, směrové kormidlo) i sekundární (klapky, spoilery, a lamely) plochy letadel.

Existují i další typy aktuátorů, avšak jejich konstrukce je podobná výše uváděným základním typům aktuátorů. Většinou jsou tyto aktuátory využity ve starších a konstrukčně jednodušších typech letadel. V silových soustavách letadel, kdy je potřeba překonat silové odpory větší než 50 kN, je časté použití aktuátorů poháněných hydraulickými okruhy. [2]

2.1.EHA

Znaky EHA jsou hydraulický píst, čerpadlo s pevně stanoveným objemem, elektromotor, akumulátor, výkonná/řídící elektronika. Předpokládá se, že je píst a čerpadlo umístěno rovnoběžně vedle sebe na stejné ose. Tohoto principu je využíváno především u větších letadel a tam kde je vyžadován vyšší výkon. [2]



Obrázek 1: model EHA



Obrázek 2: EHA

Výhody a nevýhody aktuátorů typu EHA

Výhody:

- Nízký silový odpor při zpětném pohybu pístu.
- Omezení rizika poškození z důvodu lokálního okruhu.
- Tlumení vibrací.
- Pojistné ventily, které slouží jako ochrana proti přetížení.
- Regulace rychlosti pístu. [3]

Nevýhody:

- Při vysokých rychlostech posunu pístu značný odběr energie.
- Hmotnost (vlastní elektromotor a hydraulický okruh). [3]

VARIANTY EHA

Existuje několik variant typu EHA, kdy je konstrukční řešení pozměněno a to z důvodu specializace pro určitý typ letadel (stíhačky, bombardéry) či je konstrukce staršího typu. Častou variantou je **lineární hydromotor**, který je podobný klasickému EHA, jen s rozdíly jako je absence čerpadla přímo umístěného na aktuátoru a elektromotor je upraven jako servo. U tohoto typu je jedno či více čerpadel umístěno v letadle a hydraulickými okruhy, je vedena kapalina přímo do aktuátorů, kde jako ventil slouží servo. Hydraulické obvody jsou z jistých aspektů bezpečnější. Při poruše dojde k pozvolnému snížení tlaku a vlivem aerodynamických sil dojde k zavření klapky. Lineární hydromotory jsou vhodné k řízení většiny typů ploch letadel, především pak ovládání křidélek výškového i směrového kormidla. Ve zmíněných aplikacích je nezbytná rychlá reakce aktuátoru a překonání značného zatížení. Další variantou je **hydraulický aktuátor s elektronickým ovládáním**, který je prakticky stejný jako lineární aktuátor, s tím rozdílem, že řídicí elektronika je již integrovaná. Hydraulické aktuátory je možné napájet z více hydraulických okruhů tzv. **několikanásobně zálohované řízení**, tato varianta vznikla z důvodu potřeby zvýšení bezpečnosti. [3]

Výhody a nevýhody variant EHA aktuátorů

Lineární hydromotor

Výhody:

- Vysoká rychlost pístu.
- Absence složitých elektrických zpětnovazebních obvodů.
- Váha samotného aktuátoru je nižší (absence elektromotoru).

Nevýhody:

- Váha hydraulického okruhu.
- Nemožnost autostabilizace.
- Síla je limitována centrálním čerpadlem. [3]

Hydraulický aktuátor s elektronickým ovládáním

Výhody:

- Vysoká rychlost pístu.
- Možnost autostabilizace.
- Úspora hmotnosti (absence elektromotoru).

Nevýhody:

- Váha hydraulického okruhu.
- Síla je limitována centrálním čerpadlem. [3]

Několikanásobně zálohované řízení

Výhody:

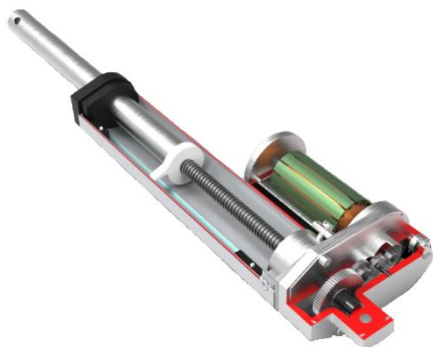
- Vysoká rychlost pístu.
- Lepší zpětná vazba (informace o pozici pístu i servo ventilů).
- Signál je zpracován analogicky (absence AD převodníku).
- Úspora hmotnosti (absence elektromotoru). [3]

Nevýhody:

- Velké množství ventilů.
- Nárůst hmotnosti řídicích ventilů.
- Šum analogového signálu. [3]

2.2. EMA

Znaky EMA aktuátoru jsou elektromotor (bezkomutátorový stejnosměrný motor), kuličkový šroub, mechanická redukce, brzda (power off brake), výkonná/řídicí elektronika. Předpokládá se, že všechny tyto součásti jsou integrovány do jednoho aktuátoru. Rozdílem od EHA aktuátoru, je především absence hydraulických okruhů, což snižuje váhu. V průměru však dosahují menší síly v porovnání s EHA. [2]



Obrázek 1: model EMA



Obrázek 2: EMA

Výhody a nevýhody aktuátorů typu EMA

Výhody:

- Hmotnost (absence lokálního hydraulického okruhu).
- Nízká spotřeba el. energie při vyšších rychlostech pístu a nižším zatížení.
- Nižší zástavbové potřeby ve srovnání s EHA. [3]

Nevýhody:

- Vysoký silový odpor při zpětném pohybu pístu.
- Vysoká spotřeba energie při konstantním řízení.
- Pravděpodobnější možnost zadření.
- Složitá kontrola tlumení (závislost na teplotě tření).
- Snížená schopnost odolávat přetížení.
- Zahřívání při konstantním zatížení.
- Při potřebě vyšších zátěží narůstá velikost převodového ústrojí, či je snížena rychlost. [3]

2.3. Přehled běžných aplikací aktuátorů

Aplikace EHA a EMA aktuátorů v avionice je dána jejich vlastnostmi, a to především silou a váhou. Převážně platí, že EMA jsou využity v menších letadlech pro řízení křidélek, výškového kormidla či směrového kormidla. Lze je využít i u větších letadel pro stabilizační křídélka, která nekladou vysoký vztlačkový odpor. U větších letadel je třeba překonávat značný odpor, proto se využívají EHA. Aplikace jednotlivých typů aktuátorů jsou shrnuty v tabulce 4. [3]

Tabulka 1: využití aktuátorů

Typ aktuátoru	Primární řízení letounu	Spoilery	Horizontální stabilizátory	Vztlačkové klapky a sloty
EHA	X	X		
EMA			X	X

Další možná využití

EHA:

Rušiče vztlaku, směrové kormidlo, překlápění rotorů, výškové kormidlo, směrové kormidlo.

EMA:

Ovládání ventilů nádrží na vodu pro hašení požárů, vektorizace tahu, ovládání podvozku, reverzace tahu, ovládání zámku dveří pro cestující, směrové kormidlo. [3]

2.4. Popis jednotlivých součástí EMA

V kapitole 2 bude popsán matematický model EMA. Z toho důvodu je nutné pochopit princip a funkčnost třech hlavních částí EMA a to **BLDC motor**, **kuličkový šroub** a **mechanickou redukci**. Dále bude popsán matematický model BLDC motoru, který je ústřední částí leteckých aktuátorů. Mechanická redukce a kuličkový šroub budou popsány základním vztahem pro přenos sil.

2.4.1. BLDC motor

Jako BLDC (Brushless Direct Current) motory jsou označovány elektronicky komutované synchronní stroje s permanentními magnety na rotoru. Díky jejich vlastnostem jako je vysoká účinnost, dlouhá životnost, vysoký rozsah otáček či dobrý poměr výkonu ku velikosti je tento motor ideální pro použití v letectví. [7]

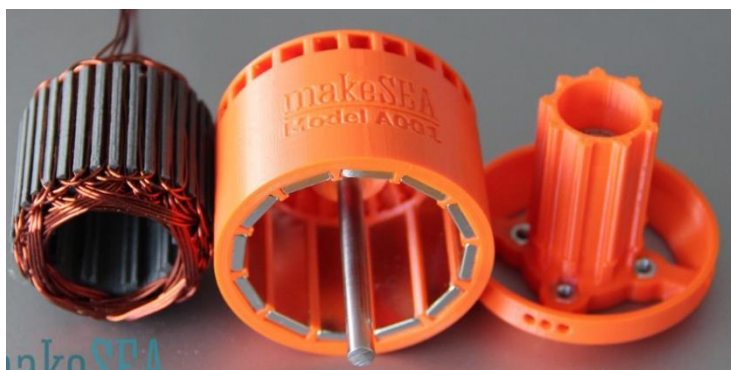
BLDC se dělí podle tvaru na válcové a diskové a podle umístění rotoru na vnější a vnitřní. Kdy vnější rotor má horší odvod tepla a vyšší setrvačnost, ale lze použít méně kvalitní magnety. Opačné vlastnosti pak platí pro vnitřní umístění rotoru. [7]

Stator je skládán z navzájem izolovaných plechů, na kterých je uloženo vinutí. Může být opatřen drážkami, nebo být bez drážek. Drážkový stator má vyšší torzní sílu a umožňuje zmenšit rozměry motoru díky efektivnějšímu přenosu magnetické energie na rotor, avšak nastává zde „cogging torque“, tedy pohyb motoru není tak plynulý. Stator bez drážek má prakticky opačné vlastnosti.

Vinutí se nejčastěji používá trojfázové, kde existují dvě základní možnosti zapojení, do trojúhelníku (Δ) nebo do hvězdy (Y). [7]

Rotor obsahuje typicky dva až osm permanentních magnetů, u kterých se střídá severní a jižní pól. Pro dosažení stability při vyšších otáčkách se magnety umísťují dovnitř rotoru, při nižších otáčkách naopak zvenčí či je možné je zapustit do rotoru. [7]

Permanentní magnety se využívají alnico, ferity a magnety ze vzácných zemin. Nejlevnější a nejméně účinné jsou ferity, avšak mají vysokou koercivitu a nevznikají ztráty vířivými proudy. Alnico mají nelineární demagnetizační křivku a jsou náchylné k demagnetizaci. Magnety vzácných zemin mají nejlepší magnetické vlastnosti, ale je třeba dbát na jejich maximální provozní teploty (350 °C) a úpravu povrchu proti korozi. [7]



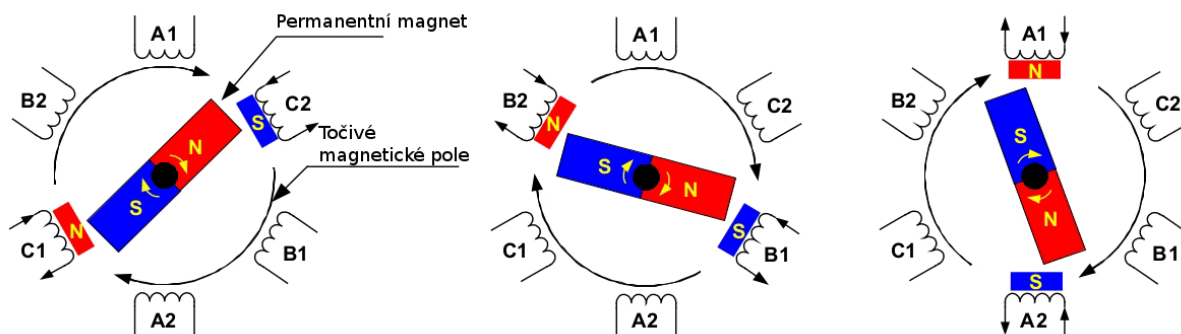
Obrázek 3: rozložený BLDC motor



Obrázek 4: BLDC motor

2.4.1.1. Princip činnosti BLDC

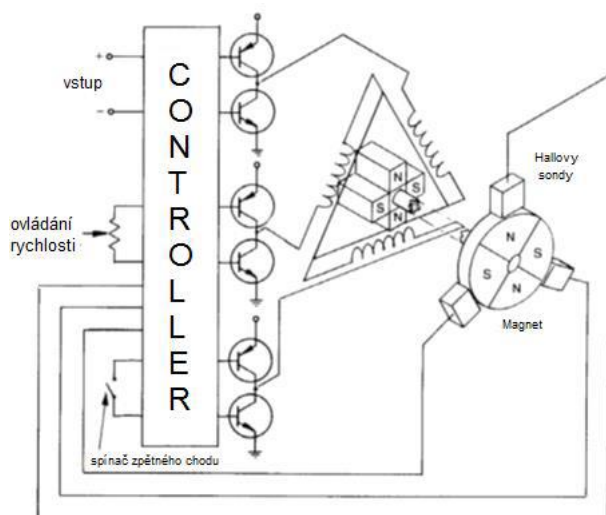
Elektromagnetický moment vzniká v důsledku interakcí mezi magnetickým polem permanentních rotorových magnetů a statorového vinutí. V ideálním případě je moment síly největší, když jsou tato pole navzájem kolmá a klesá, když se úhel mezi nimi mění. Aby se motor otáčel nepřetržitě, musí se pomocí vhodného spínání fází měnit magnetické pole statoru. Procesu přepínání fází se říká komutace a u BLDC motorů je realizována elektronicky na základě informace o poloze rotoru. Pro plynulý chod rotoru musí platit, že současně jsou komutovány jen dvě vinutí a součet komutovaných napětí je konstantní. [7]



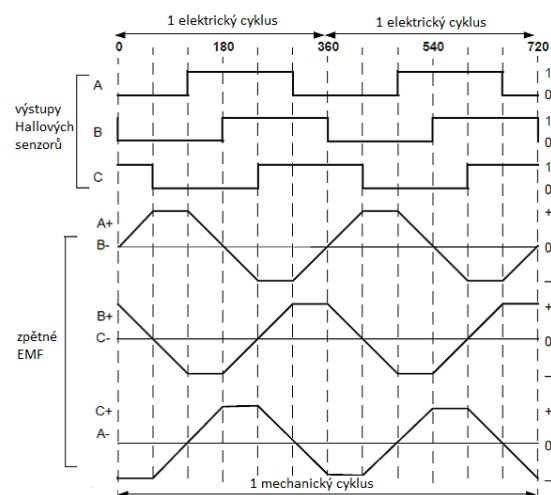
Obrázek 5: komutace

2.4.1.2. Určení polohy rotoru

Ke stanovení polohy rotoru můžeme využít **senzory** či **bez senzorové** řízení. Základním nejpoužívanějším senzorem je **Hallova sonda**, která funguje na principu Hallova jevu, kdy jsme schopni zaznamenat průchod severního či jižního pólu permanentního magnetu okolo sondy. Pro přesné řízení je třeba mít alespoň 3 sondy posunuté o úhel 120° . [7]

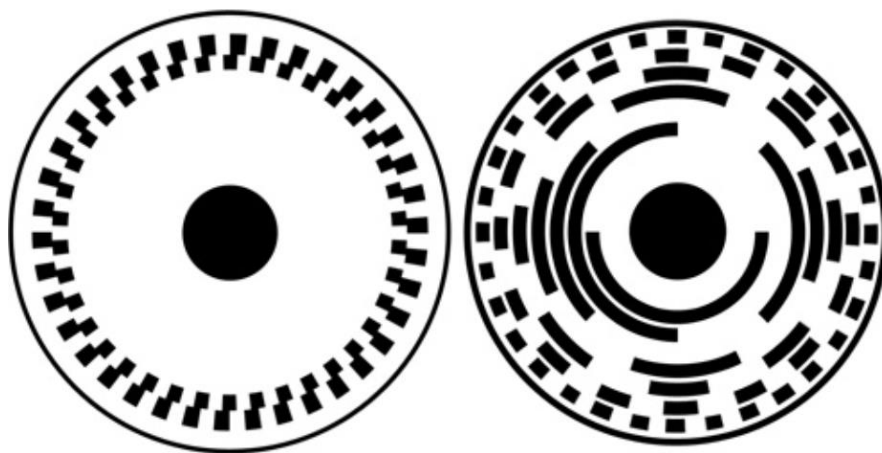


Obrázek 8: schématický náčrt motoru s Hallovou sondou



Obrázek 9: výstup Hallové sondy

Dalším typem snímačů jsou rotační **enkodéry**, a to absolutní a inkrementální. Tento snímač je použit i u reálného modelu. Absolutní enkodér má menší rozlišení než inkrementální, ale dokáže přesně určit polohu natočení rotoru. Inkrementální snímač pro určení polohy musí čítat počet signálů. Absolutní enkodér posílá na výstup unikátní kód, který přesně označí určitý rozsah úhlu, na rozdíl od inkrementálního, jehož výstup nám bez čítače neurčí přesnou polohu. Snímač se skládá ze tří hlavních složek. První část je disk. Na disku jsou po obvodu rozmístěny průhledné a neprůhledné úseky, nebo též odrazivé a neodrazivé úseky. Další část je optický vysílač, který je tvořen led diodou vyzařující viditelné nebo infračervené záření. Poslední část je optický přijímač realizovaný jako fototranzistor nebo fotodioda. Složení absolutního a inkrementálního snímače se může lišit i v počtu vysílačů a přijímačů, kde absolutní enkodér jich může obsahovat 8 až 32 a inkrementální snímač pracuje pouze s jedním či dvěma. Princip je takový, že kotouč je připevněn na klasické vystouplé hřídeli či na duté hřídeli, do které se zasune či jinak připojí měřená hřídel motoru. S tím jak se otáčí měřená hřídel, se otáčí i kotouč, který je ozařován LED diodou a pokud je signál zacloněn, je výstup z přijímače nula po odclonění jedna. Podobně funguje i odrazení signálu od odrazivých ploch kotouče. Některé inkrementální snímače mají na kotouči značky rozmístěny dvakrát, a to v podobě vnějšího a vnitřního kruhu, kdy jsou tyto kruhy oproti sobě posunuty. Díky tomuto posunu lze určit směr otáčení enkodéru. V této práci popisovaný a sestavený EMA využívá enkodéru s rozlišením 1024 pulzů na otáčku, což odpovídá 0,35 stupně. [7]



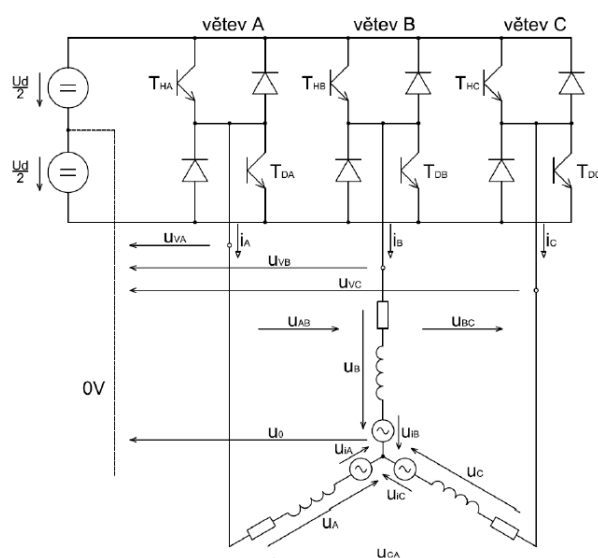
Obrázek 6: inkrementální a absolutní disk enkodéru

Poslední typ senzoru je **resolver**. V principu se jedná o rotační elektromechanický transformátor. Výstupem je funkce sinus a cosinus, vzájemně posunutá o 90° . Poloha se pak určí podle velikosti amplitud a rychlost z frekvence. Směr otáčení lze určit ze vzájemné polohy indukovaných napětí. [7]

Další možnost je **bez senzorové** řízení využívané především u motorů s výkonem do 1kW. Náklady na senzory by mohly zvyšovat cenu motoru, a proto se využívá dvou základních principů. Prvním principem je detekce průchodů nulou indukovaného napětí (back EMF) a druhým principem je detekce třetí harmonické statorového napětí. Tyto metody však nejsou tak přesné, jako senzorové určení polohy a mohou nastat potíže při určení polohy, při nižších otáčkách. [7]

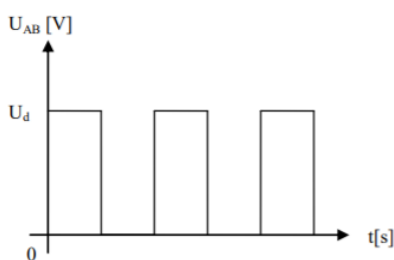
2.4.1.3. komutace a řízení BLDC motoru

Pro dosažení otáčení rotoru nestačí pouze připojit napětí k vinutí motoru, ale je třeba jej komutovat, tedy spínat určité cívky ve správný čas. K tomuto účelu slouží třífázový střídač. Tento obvod je tvořen třemi větvemi. Každá větev je tvořena dvěma tranzistory a dvěma diodami. Často jsou využívány tranzistory MOS-FET, které mají přímo integrované diody. Jednotlivé větve trojfázového střídače jsou poté přímo připojeny na vinutí motoru. K ovládání tohoto obvodu jsou využity signály, které jsou generovány mikroprocesorem. Mikroprocesor poté obsahuje řídicí algoritmus. [7]

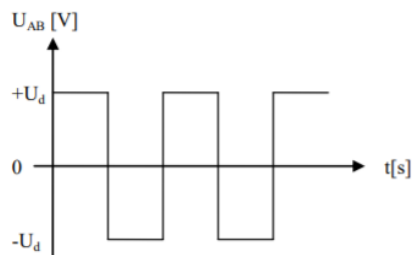


Obrázek 8: schématický náčrt motoru se střídačem

Spínání jednotlivých fází můžeme dělit na **unipolární** a **bipolární**. Unipolární spínání využívá toho, že sepne dvě fáze (T_{HA} a T_{DB}), a poté jednu z těchto fází vypne (T_{HA}), a zapne třetí (T_{DA}), čímž se fáze zkratují a napětí je tedy nulové. Bipolární spínání funguje podobným způsobem. Rozdíl je ten, že se střídavě spínají tranzistory T_{HA} a T_{DB} a poté T_{DA} a T_{HB} . Takto je dosaženo změny polarity. Existuje ještě třetí způsob spínání, nezávislé komplementární spínání. U tohoto typu je třeba dodržet určitý časový rozestup mezi spínáním tranzistorů, abychom zabránili sepnutí více tranzistorů současně. [7]



Obrázek 9: unipolární spínání



Obrázek 7: bipolární spínání

Řídicí algoritmus motoru můžeme realizovat dvěma způsoby. Metodou 6krokové komutace nebo vektorovým řízením (FOC - field oriented control).

6kroková komutace funguje na jednoduchém principu, kdy Hallova sonda udává polohu rotoru, a v závislosti na jeho poloze se vždy komutují dvě fáze. Tato metoda ve srovnání s FOC je jednodušší, a také je vhodná pro regulaci motoru ve vyšších otáčkách. Nevýhodou je nelinearita, která je způsobena sepnutím pouze dvou vinutí současně, což vyvolává cukání rotoru, vibrace a hluk. V této práci popsaný a sestavený EMA využívá vektorové řízení. [7]

FOC se využívá v náročnějších aplikacích kde je brán zřetel na přesné určení otáček, torzní síly a polohy rotoru. Proto je třeba i přesné určení polohy rotoru a to za pomoci enkodéru. FOC prakticky stále posílá motoru řídicí signály tedy vždy, když dojde ke vzorkování. V principu se komutují vinutí tak aby jejich elektromagnetický tok byl vždy v pravém úhlu k magnetickému toku rotoru. Tím se vytváří plynulý chod a je zajištěna maximální torzní síla. K dosažení pravého úhlu mezi magnetickými toky se využívá Parkova a Klarkova transformace. Silový magnetický tok je poté reprezentován jako otáčivý vektor, který se otáčí současně s rotorem. Clarkova transformace zajistí aby se střídavé sinusové napětí i_a, i_b, i_c transformovalo na dvoufázový v čase proměnný signál i_α, i_β . Tato transformace je platná díky Kirchhoffovu zákonu proudových uzlů. [7]

Rovnice Clarkovy transformace: [6]

$$i_a = i_\alpha \quad [A] \quad (1)$$

$$i_\beta = \frac{1}{\sqrt{3}} i_a + \frac{1}{\sqrt{3}} i_b \quad [A] \quad (2)$$

i_a, i_b = proud na fázi a, b

i_α, i_β = proud v α, β souřadnicích

Pro další usnadnění řízení motoru je třeba zrušit závislost výstupního momentu na pozici rotoru. Parkova transformace poté převede signál do časově nezávislých souřadnic d (direct) a q (quadrature), které jsou navzájem kolmé. Nový souřadný systém se současně otáčí s rotorem. Je výhodné, aby d složka byla stále blízko nule a q složka se zvyšovala s potřebou růstu výkonu motoru.

Rovnice Parkovy transformace: [6]

$$i_d = i_\alpha \cos(\theta) + i_\beta \sin(\theta) \quad [A] \quad (3)$$

$$i_q = -i_\alpha \sin(\theta) + i_\beta \cos(\theta) \quad [A] \quad (4)$$

i_α, i_β = proud v α, β souřadnicích

i_d, i_q = proud v d, q souřadnicích

θ = úhel pootočení rotoru

Signál vstupující do jednotlivých střídačů je poté generován střídou PWM kdy se signál mění s určitou rychlostí mezi stavem 0 a 1.

2.4.2. Kuličkový šroub

Další hlavní součástí EMA je kuličkový šroub. Tento prvek převádí rotační pohyb na přímočarý. Převod se uskuteční za pomoci planetární převodovky. Kuličkový šroub má v porovnání s běžnými kluznými posuvnými šrouby výrazně vyšší účinnost a nižší potřebný točivý moment. Mohla by nastat situace, kdy se kuličkový šroub zadrhne, a poté se letadlo stane neovladatelným.

Z toho důvodu je třeba zajistit, aby se do matice nedostaly nečistoty a šroub pravidelně mazat. Dále je pro správnou funkčnost důležité zatěžovat matici jen v axiálním směru.



Obrázek 11: model kuličkového šroubu



Obrázek 10: kuličkový šroub

2.4.3. Mechanická redukce

Pro přenos sil mezi motorem a kuličkovým šroubem se využívají převodové skříně. V této práci bylo využito řemenic s poměrem 1:2, tedy do nižších otáček. Převodový poměr se v závislosti na typu klapky volí tak, aby bylo dosaženo kompromisu mezi rychlostí a silou. Dále bych dodal, že zbytek aktuátoru tvoří ložiska a tělo aktuátoru. Tělo je vyrobeno ze slitiny, která je kompromisem mezi váhou a pevností.

3. MATEMATICKÝ MODEL EMA

Pro co nejlepší výsledky při regulaci polohy klapky letadla, je výhodné si tuto soustavu matematicky simulovat. Model věrně aproximuje reálný systém, avšak z fyzikální podstaty se můžeme pouze blížit reálnému chování aktuátoru. Důvodem jsou nesčetné nelinearity jednotlivých součástí, kde každá je zatížena chybami. Nelinearity mohou být turbulence prostředí, změna teplot, nečistoty mezi ložisky, nevyvážené těžiště motoru, parazitické vlastnosti elektrických součástek, mechanické nepřesnosti, jako je vůle v převodech a mnoho dalších. Hlavní předností simulace je možnost testovat změny parametrů přímo v matematickém modelu. Kupříkladu při reálném testování změn parametrů magnetické indukce, bychom museli převinout všechny cívky statoru, což je finančně a časově náročné.

Model BLDC motoru předpokládá ideální trapézový průběh napětí na vinutí. Dále se předpokládá, že vinutí je od sebe rozmístěno o stejný úhel 120° a každé má stejný odpor a magnetické vlastnosti. Je zanedbána změna teploty vinutí při chodu motoru, ztráty v statorovém plechu, nasycení a hystereze motoru. Samozřejmě se předpokládá, že motor není ve vnějším magnetickém poli, které je způsobeno okolními obvody. Motor bude simulován bez tlumícího vinutí. Kuličkový šroub bude popsán lineárním převodem, který znázorňuje polohu matice v závislosti na otáčkách. Řemenice budou popsány vztahem pro poměr přenosu sil. Tření bude zohledněno, ale další vlastnosti, jako jsou vnější podmínky či nelinearity již zohledněny nebudou. Zátěž reálného aktuátoru tvoří atmosférické jevy, jako je odpor vzduchu, vztlak, turbulence, déšť atd. Atmosférický tlak se dá přirovnat k chování pružiny. Při sestavení modelu bylo využito gummy. Matematický model bude brát v potaz nepřesnosti, které by mohly při regulaci vzniknout viskózním třením či setrvačným momentem rotovaných částí. Ostatní nelinearity jsou zanedbány. [6]

V reálném aktuátoru je využit snímač polohy pístu pro efektivnější zpětnou vazbu. V této práci byl předpokládán LVDT snímač s rozsahem alespoň 200 mm. Bohužel žádný z oslovených výrobců nedokázal vyhovět ceně či rozsahu požadované poptávky. Poloha matice se tedy bude vyvozovat z počtu otáček, které snímá enkodér. [6]

3.1. Matematický model BLDC

Pro věrné napodobení chování motoru je třeba brát ohled na změnu komutovaných stavů. Motor se chová lehce odlišně při vykonávání samotné komutace, dále při časovém úseku mezi dvěma komutacemi. Můžeme však všeobecně popsat chování motoru. Lze popsat magnetické vazby, elektrický moment a další vlastnosti. Z tohoto všeobecného popisu lze poté odvozovat chování motoru při jednotlivých stavech. [6]

Rovnice pro jednotlivá napětí na fázích statoru: [11]

$$\begin{aligned} u_a &= R_a i_a + \frac{d\psi_a}{dt} \\ u_b &= R_b i_b + \frac{d\psi_b}{dt} \\ u_c &= R_c i_c + \frac{d\psi_c}{dt} \end{aligned} \quad [V] \quad (5)$$

u_a, u_b, u_c = napětí na fázi a, b, c
 R_a, R_b, R_c = činný odpor na fázi a, b, c
 i_a, i_b, i_c = proud na fázi a, b, c
 ψ_a, ψ_b, ψ_c = spřažený magnetický tok fázi a, b, c

Rovnice spřažených magnetických toků na fázích statoru: [11]

$$\begin{aligned} \psi_a &= L_a i_a + L_{ab} i_b + L_{ac} i_c + \psi_{PMa}(\theta) \\ \psi_b &= L_b i_b + L_{ba} i_a + L_{bc} i_c + \psi_{PMb}(\theta) \\ \psi_c &= L_c i_c + L_{ca} i_a + L_{cb} i_b + \psi_{PMc}(\theta) \end{aligned} \quad [Wb] \quad (6)$$

ψ_a, ψ_b, ψ_c = spřažený magnetický tok fázi a, b, c
 L_a, L_b, L_c = indukčnost na fázi a, b, c
 i_a, i_b, i_c = proud na fázi a, b, c
 $\psi_{PMa}, \psi_{PMb}, \psi_{PMc}$ = spřažené magnetické toky permanentních magnetů a fází a, b, c
 $L_{ab}, L_{ba}, L_{ca}, L_{ac}, L_{bc}, L_{cb}$ = indukčnost mezi fázemi ab, ba, ca, ac, bc, cb
 θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°)

Rovnice vnitřního elektomagnetického momentu: [11]

$$M_e = i_a \frac{d\psi_{PMa}}{d(\theta)} + i_b \frac{d\psi_{PMb}}{d(\theta)} + i_c \frac{d\psi_{PMc}}{d(\theta)} \quad [Nm] \quad (7)$$

M_e = elektomagnetický moment
 i_a, i_b, i_c = proud na fázi a, b, c
 $\psi_{PMa}, \psi_{PMb}, \psi_{PMc}$ = spřažené magnetické toky permanentních magnetů a fází a, b, c
 θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°)

Pohybová rovnice: [11]

$$M_e - M_L = J_c \frac{d\Omega_m}{dt} \quad [Nm] \quad (8)$$

M_e = elektomagnetický moment

M_L = zátěžový moment

J_c = celkový moment setrvačnosti

Ω_m = mechanická úhlová rychlost

Rovnice závislosti elektrické rychlosti a skutečné mechanické rychlosti: [11]

$$\omega = p \Omega_m \quad [rad\ s^{-1}] \quad (9)$$

ω = elektrická úhlová rychlost

p = počet pól párů

Ω_m = mechanická úhlová rychlost

Z výše popsaného všeobecně platného chování motoru, lze odvozovat další vlastnosti. Následující část rovnic popisuje chování motoru na časovém úseku mezi dvěma komutacemi, a to konkrétně mezi úhlem natočení rotoru od 0° do 60° , kde platí $i_a = -i_b$, $i_c = 0$, $u_{ab} = u_a - u_b$. Předpokládáme, že činné odpory fázové indukčnosti a vzájemné indukčnosti jsou shodné a budou značeny R_s - činné odpory, L_s - fázové indukčnosti a L_m - vzájemné indukčnosti.

Rovnice pro spřažené magnetické toky (pro úhel 0° až 60°):[11]

$$\begin{aligned} \psi_a &= (L_s - L_m)i_a + \psi_{PMa}(\theta) = Li_a + \psi_{PMa}(\theta) \\ \psi_b &= (L_s - L_m)i_b + \psi_{PMb}(\theta) = -Li_a + \psi_{PMa}(\theta) \\ \psi_c &= \psi_{PMc}(\theta) \end{aligned} \quad [Wb] \quad (10)$$

ψ_a, ψ_b, ψ_c = spřažený magnetický tok fázi a, b, c

L_s, L_m = fázové indukčnosti, vzájemné indukčnosti

i_a, i_b, i_c = proud na fázi a, b, c

$\psi_{PMa}, \psi_{PMb}, \psi_{PMc}$ = spřažené magnetické toky permanentních magnetů a fází a, b, c

θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°)

Rovnice pro napětí na fázích statoru (pro úhel 0° až 60°):[11]

$$u_{ab} = u_a - u_b = 2R_s i_a + 2L \frac{di_a}{dt} + \omega \frac{d\psi_{PMa}}{d\theta} - \omega \frac{d\psi_{PMb}}{d\theta} \quad [V] \quad (11)$$

$$u_{ab} = 2R_s i_a + 2L \frac{di_a}{dt} + u_{ia} - u_{ib} \quad [V] \quad (12)$$

ψ_{PMa}, ψ_{PMb} = spřažené magnetické toky permanentních magnetů a fází a, b

θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°)

u_a, u_b, u_{ab} = napětí na fázi a, b, napětí mezi fázemi a, b

u_{ia}, u_{ib} = indukované napětí na fázi a, b

i_a, i_b, i_c = proud na fázi a, b, c

ω = elektrická úhlová rychlost

$L = L_s - L_m$ = indukčnost

R_s = činný odpor na fázi

Rovnice vnitřního elektomagnetického momentu (pro úhel 0° až 60°):[11]

$$M_e = 2i_d \frac{d\psi_{PMa}}{d(\theta)} = -2i_d \frac{d\psi_{PMb}}{d(\theta)} \quad [Nm] \quad (13)$$

M_e = elektomagnetický moment

i_d = proud dynamický (cyklická změna na fázi a → b → c)

ψ_{PMa}, ψ_{PMb} = spřažené magnetické toky permanentních magnetů a fází a, b,

θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°) Ω

Rovnice závislosti elektrické rychlosti (pro úhel 0° až 60°):[11]

$$\omega = \frac{d\theta}{dt} \quad [rad\ s^{-1}] \quad (14)$$

ω = elektrická úhlová rychlost

θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°) Ω

Rovnice indukovaného napětí (pro úhel 0° až 60°):[11]

$$u_i = \omega \frac{d\psi_{PM}}{d\theta} \quad [V] \quad (15)$$

u_i = indukované napětí

ω = elektrická úhlová rychlost

ψ_{PM} = spřažené magnetické toky permanentních magnetů

θ = úhel pootočení rotoru (periodická funkce s posunem 120°) Ω

Rovnice vyjadřující proud po Laplaceově transformaci (pro úhel 0° až 60°):

$$I(p) = \frac{1/2R_s}{1 + pT_e} (U_{ab}(p) - U_{ia}(p) + U_{ib}(p)) \quad [A] \quad (16)$$

I = proud

R_s = činný odpor na fázi

u_{ia}, u_{ib}, u_{ab} = indukované napětí na fázi a, b, napětí na fázi ab

$T_e = L/R_s$ = elektromagnetická časová konstanta stroje

Stejným způsobem jakým byly odvozeny rovnice pro úhel 0° až 60°, lze odvodit rovnice pro úhel 60° až 360°. Tyto vztahy jsou sepsány přehledně do tabulky. Dále lze odvodit chování motoru při komutaci. Je třeba brát v potaz polohu rotoru, polaritu proudu a výstupní napětí měniče. [11]

Tabulka 2: odvozené rovnice popisující chování motoru [11]

Úhel α [°]	I [A] pro úhel α° je rovno vztahu:	I_a	I_b	I_c
0° – 60°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{ab} - U_{ia} + U_{ib})$	I	$-I$	0
60° – 120°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{ac} - U_{ia} + U_{ic})$	I	0	$-I$
120° – 180°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{bc} - U_{ib} + U_{ic})$	0	I	$-I$
180° – 240°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{ba} - U_{ib} + U_{ia})$	$-I$	I	0
240° – 300°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{ca} - U_{ic} + U_{ia})$	$-I$	0	I
300° – 360°	$\frac{1/2R_s}{1+pT_e} (U_{cb} - U_{ic} + U_{ib})$	0	$-I$	I

3.2. Vztahy pro kuličkový šroub

Rovnice torzní síly:

$$T = \frac{Fl}{2\pi v} \quad [Nm] \quad (17)$$

T = torzní síla

F = síla působící lineárně na matici kuličkového ložiska

l = stoupání závitu kuličkového šroubu

v = účinnost kuličkového šroubu (většinou 0.85% až 0.95%)

Rovnice síly kuličkového šroubu:

$$F = \frac{2\pi v T}{l} \quad [N] \quad (18)$$

F = síla působící lineárně na matici kuličkového ložiska

T = torzní síla

l = stoupání závitu kuličkového šroubu

v = účinnost kuličkového šroubu (většinou 0,85% až 0,95%)

Rovnice závislosti otáček šroubu na pozici matice kuličkového ložiska:

$$l = xn \quad [m] \quad (19)$$

l = posun matice

x = konstanta zdvihu šroubu

n = počet otáček

3.3. Vztahy pro mechanickou redukci

Rovnice převodového poměru: [6]

$$\tau = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{n_1}{n_2} = \frac{z_2}{z_1} = \frac{r_2}{r_1} \quad [-] \quad (20)$$

τ = převodový poměr

ω_1, ω_2 = úhlová rychlost poháněné hřídele/ozubeného kola

n_1, n_2 = počet otáček

r_1, r_2 = poloměr ozubeného kola

z_1, z_2 = počet zubů kola

Rovnice kroutícího momentu:

$$M = F_t \frac{d}{2} \quad [Nm] \quad (21)$$

M = kroutící moment

F_t = síla ozubeného kola kolmá na osu otáčení

d = průměr kola (vzdálenost od středu zubu k protilehlému středu zubu)

3.4. Model zátěže aktuátoru

Rovnice rovnováhy momentu motoru a zátěže:

$$\frac{d\omega}{dt}J = T_m - \beta\omega - \eta T_{ext} \quad [Nm^2s^{-1}] \quad (22)$$

ωJ = setrvačný moment (ω = uhlová rychlost motoru, J = moment setrvačnosti motoru)

T_m = moment motoru

$\beta\omega$ = viskózní tření (β = koeficient tření, ω = uhlová rychlost motoru)

ηT_{ext} = moment zátěže (η = účinnost převodů, T_{ext} = vnější zátěž aerodynamických sil)

Rovnice polohy posunu matice kuličkového šroubu v závislosti na zátěži:

$$\frac{d^2y}{dt^2} = \frac{T_m}{\tau J} - \frac{\beta}{J} \frac{dy}{dt} - \frac{\eta F}{\tau J} \quad [m] \quad (23)$$

y = hodnota posunu

T_m = moment motoru

β = koeficient tření

τ = převodový poměr mezi rotací motoru a posunu matice

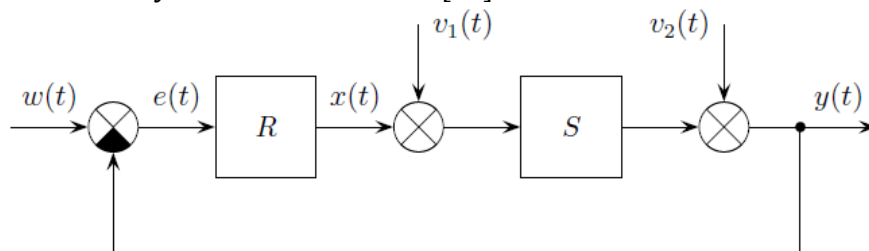
η = účinnost převodů

F = síla působící na výstupní tyč

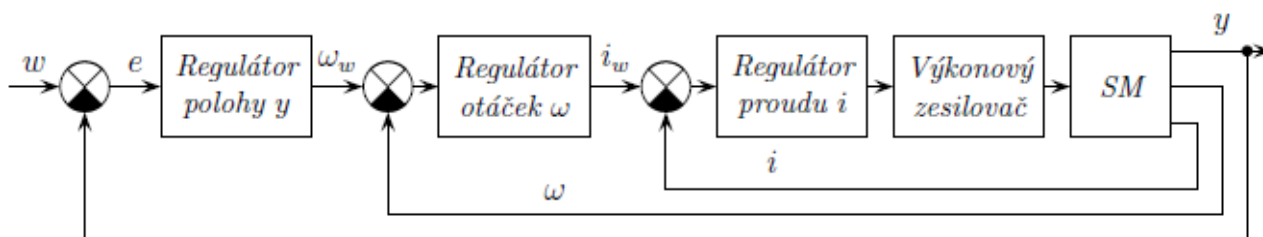
J = moment setrvačnosti motoru

4. REGULAČNÍ STRUKTURA KOMPENZUJÍCÍ PORUCHOVÉ SIGNÁLY PŮSOBÍCÍ NA PLOCHY LETADLA

Regulace úhlu natočení klapky letounu se převádí na regulaci polohy matice na šroubu. Tato úloha se však nedá řešit pomocí ovládání v otevřené smyčce či regulovat přímo pomocí klasické struktury zpětnovazebního řízení. Řízení polohy vyžaduje více uzavřených smyček. Je třeba řídit proud na vinutí pro plynulé otáčky motoru. Dále je třeba řídit rychlost otáček rotoru, a teprve poté je možné přejít k regulaci polohy. Pro řešení tohoto problému se nejlépe uplatní schéma rozvětvené struktury servomechanismu. [10]



Obrázek 13: klasická struktura zpětnovazebního řízení [10]



Obrázek 12: schéma rozvětvené struktury servomechanismu [10]

4.1. schéma rozvětvené struktury servomechanismu

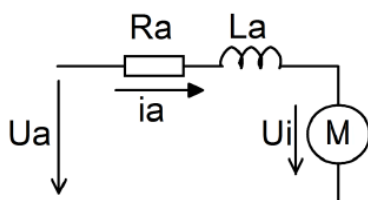
Rozvětvené schéma servomechanismu se dá všeobecně využít pro řízení více typů elektromotorů. Toto schéma je tvořeno třemi uzavřenými regulačními smyčkami. Tedy máme i tři regulátory, kde hlavní regulátor je regulátor polohy. Níže je postaven regulátor otáček, který řídí nejnižší postavený regulátor proudu. Řídící veličina ω určuje požadovanou hodnotu systému a regulační obvod se snaží dosáhnout schody, kdy je rozdíl aktuální regulované veličiny y a hodnoty ω roven či blízko nule. Tohoto se dá nejlépe dosáhnout postupným nastavováním jednotlivých parametrů regulátorů, od nejnižší postaveného k řídícímu. [10]

Pro nastavení proudového regulátoru se nejčastěji používá aproximace přenosu vinutí s měničem. Tento přenos je pak prvního řádu. [10]
Regulátor poté může být navržen jakoukoliv metodou (Standardních tvarů, frekvenčních charakteristik, Optimálního modulu, Zigler-Nicholse, Kořenového hodografu atd.). Nejčastější doporučený tvar regulátoru pro regulaci proudu je PI. PID regulátor se nepoužívá z důvodu zesílení šumových signálů, a samotná P složka nezajistí dosažení přesné požadované hodnoty. V našem případě bude nastavení parametrů probíhat ručně (empirical gain tuning). Jako první se nastavuje proporcionální složka. Zesílení regulátoru by mělo dosahovat požadované hodnoty a zároveň by mělo být určitým kompromisem mezi rychlostí náběhu křivky a překmitem. Přechodová charakteristika by u regulátoru proudu neměla být příliš kmitavá (z toho důvodu, aby bylo možné nastavit i ostatní regulátory bez překračování mezí stability) a podle toho se nastaví I složka, která zajistí přesnou požadovanou hodnotu. Tato složka sice prodlouží dobu regulace a přidá kmitavý charakter, ale za to dosáhneme přesné požadované hodnoty.

Pro nastavení regulátoru rychlosti jsem využil PI regulátor, ale lze použít i P regulátor. PD regulátor by sice zajistil rychlejší dobu regulace a méně kmitavý průběh přechodové charakteristiky ale způsobil by opět zesílení šumu. PID regulátor by byl nevhodný. [10]

Regulátor polohy jsem zvolil P. Každý přidaný astatismus do systému snižuje stabilitu, a proto není vhodné použít PI regulátor či PID regulátor. Bylo by však možné prohodit regulátor polohy a rychlosti, aniž by to mělo zásadní vliv na průběh regulace. [10]

Nastavení parametrů regulátoru probíhalo od nejnižší smyčky po nejvyšší, s tím, že přechodová charakteristika byla volena tak, aby byla spíše tlumená či s minimálním překmitem. Byla vždy nastavena P složka od nižšího zesílení k vyššímu, a až poté byla nastavena I složka. Chování jednotlivých regulátorů je shrnuto v následujících třech tabulkách. [10]



Obrázek 14: schéma vinutí motoru

Rovnice aproximace vinutí: [10]

$$F_m(p) = \frac{K_m}{1+p\tau_a} \quad \text{kde} \quad \tau_a = \frac{L}{R} \text{ e} \quad [-] \quad (24)$$

K_m = konstanta motoru

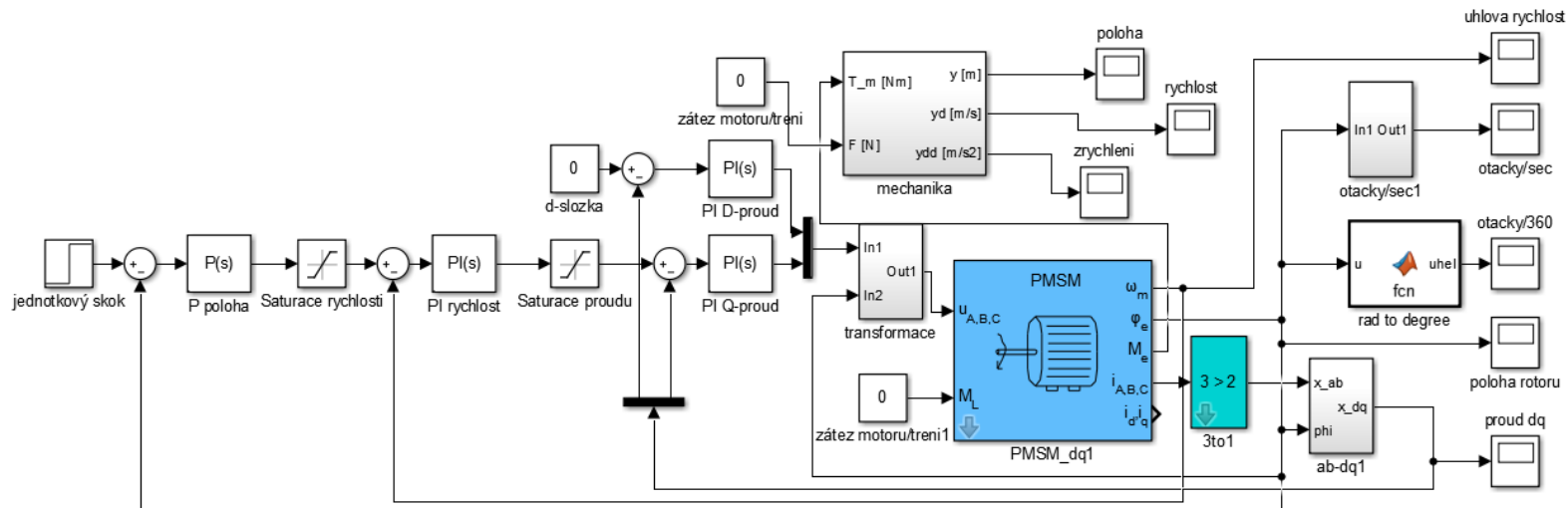
τ_a = elektrická časová konstanta

L = indukčnost

R = odpor

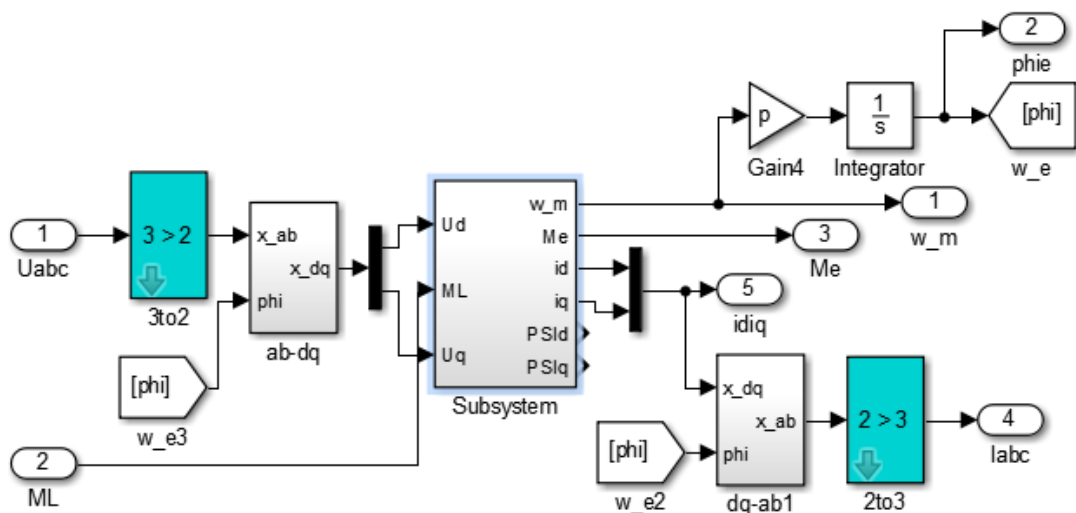
4.2. rozvětvená struktura aplikovaná v Simulinku

Schéma v Simulinku je vytvořeno podle rozvětvené struktury servomechanismu, jen s tím rozdílem, že pro regulaci proudu jsou využity dva regulátory z důvodu Parkovy a Clarkovy transformace. Jako řídicí veličina je použit jednotkový skok. BLDC motor je zde nahrazen PMSM motorem, který má podobné vlastnosti. Ve struktuře je také přidána saturace proudu a rychlosti pro zajištění stability systému při vyšších otáčkách. Pro řízení motoru je využito FOC, které zajišťují bločky transformace, „3 to 2“ a ab-dq1.



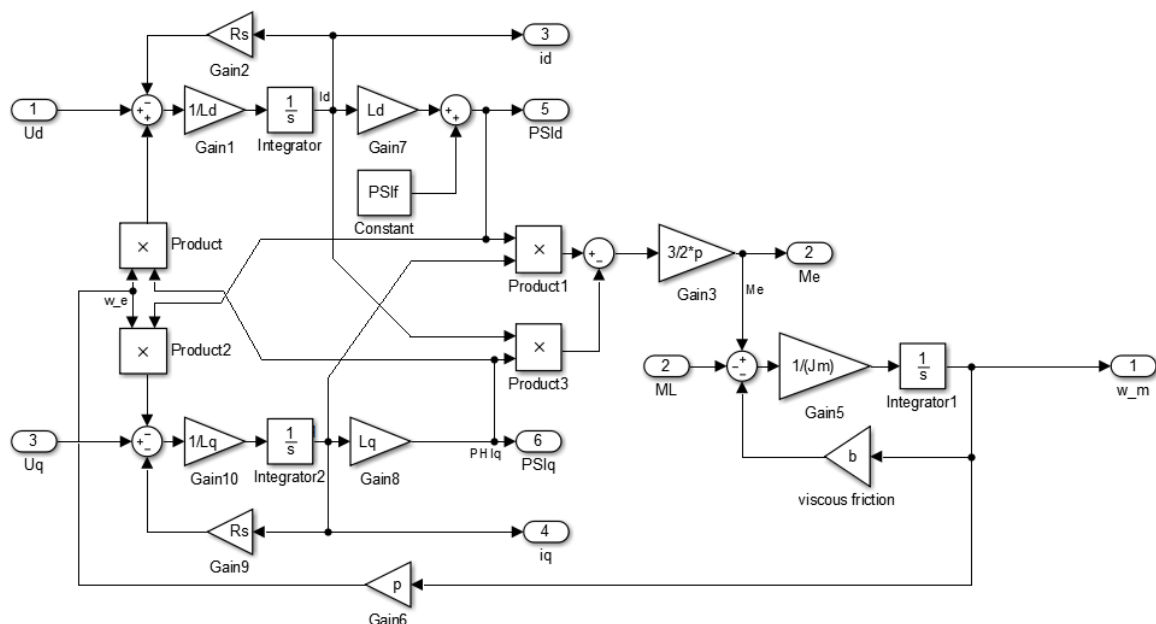
Obrázek 15: schéma rozvětvené struktury servomechanismu aplikované v Simulinku

Bloček PMSM motoru má dva vstupy. První vstup je napětí pro jednotlivé fáze A,B,C. Druhým vstupem je možnost simulace viskózního tření zátěže.



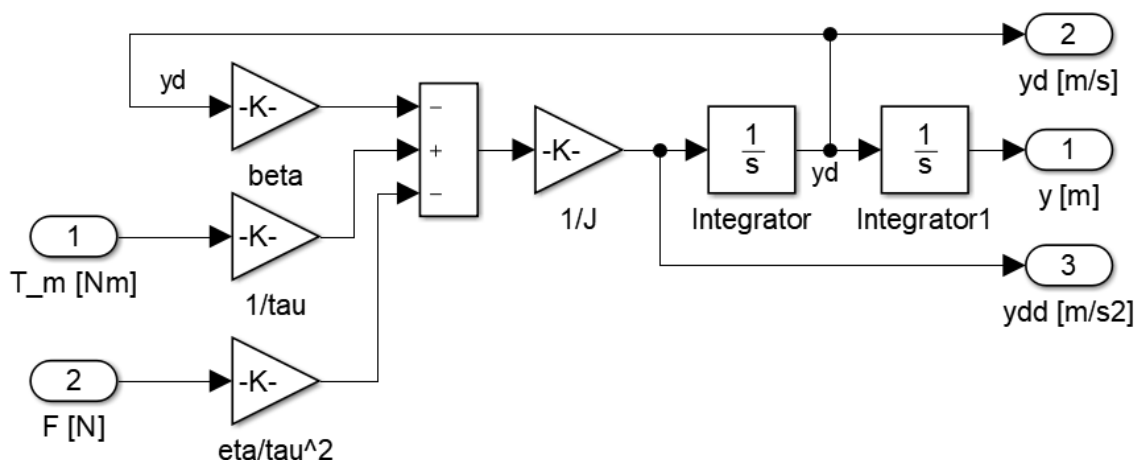
Obrázek 16: model FOC transformací se subsystémem motoru

Motor obsahuje pět výstupů. Proud, dq složky proudu, úhlovou rychlost, polohu rotoru a moment motoru. Proud je vstupní veličinou do sumátoru, spolu s požadovanou hodnotou proudu poté tvoří vstupní odchylku pro regulátor proudu a pro q složku. D složka je řízena na nulu. Úhlová rychlost vstupuje do sumátoru s požadovanou hodnotou rychlosti a poté do regulátoru rychlosti otáček. Poloha rotoru je u reálného modelu odvozena od enkodéru s rozlišením 1024 pulzů na otáčku. Zde poloha vstupuje do sumátoru s hlavní řídicí veličinou polohy a odtud do regulátoru polohy. Moment motoru vstupuje do bločku mechanika simulující kuličkový šroub a převody.



Obrázek 17: model motoru

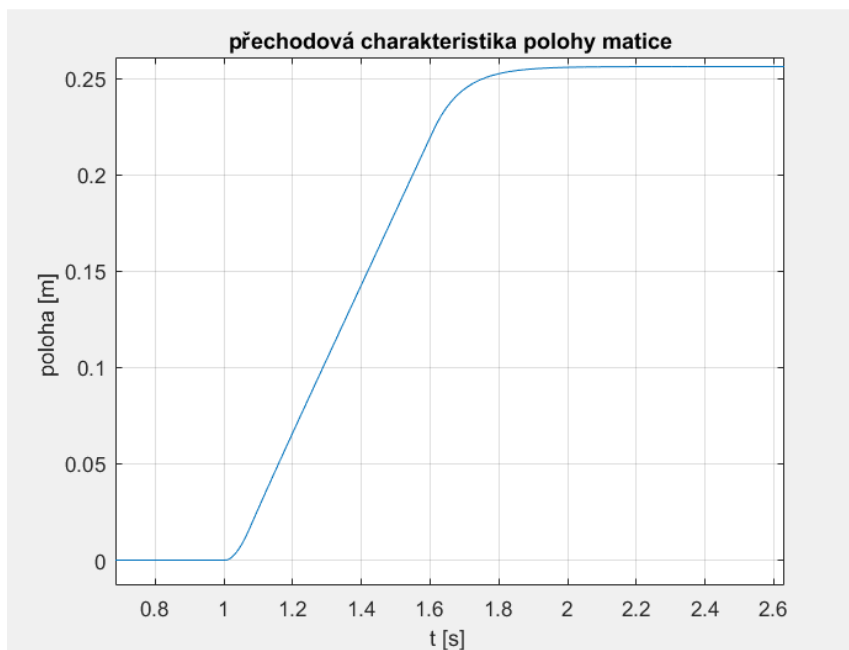
Dalším vstupem bločku mechanika je opět viskózní tření. Výstupem je vzdálenost, tedy přepočet otáček na polohu. Další dva výstupy jsou pouze informativního charakteru. Derivace polohy, tedy rychlost a derivace rychlosti, tedy zrychlení.



Obrázek 18: model zátěže

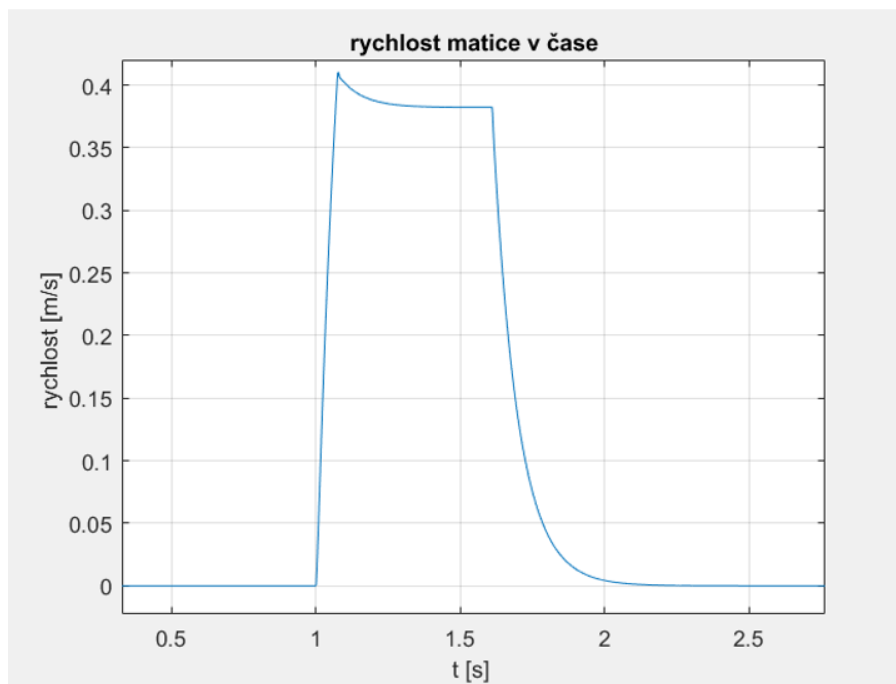
4.3.SIMULAČNÍ OVĚŘENÍ FUNKČNOSTI REGULACE

Výsledkem celého regulačního procesu je regulace polohy matice. Přechodová charakteristika je reakce na požadovanou polohu rotoru a to 400 radiánů, což odpovídá přibližně posunu matice o 26 cm. (Stejně tak i další graficky zobrazená data jsou reakcí na jednotkový skok 400 radiánů.) Přechodová charakteristika je spíše tlumená, bez překmitu a celková doba regulace je okolo 0.8 vteřiny. Se zvyšující se zátěží a třením by se doba regulace mohla prodlužovat.



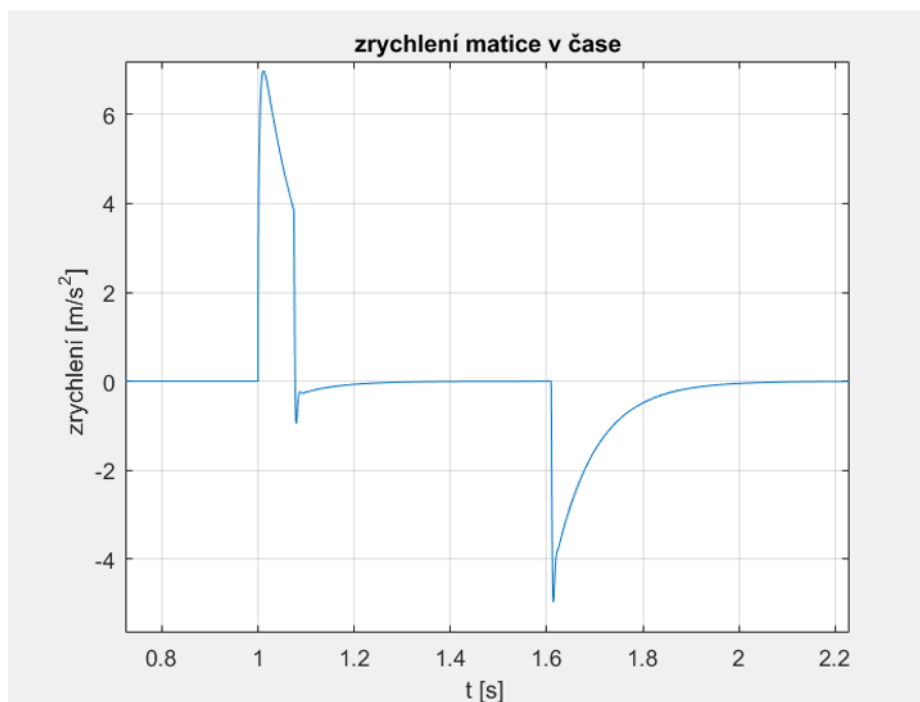
Graf: 1 přechodová charakteristika polohy matice

Maximální dosažená rychlost matice odpovídá 0.41 m/s. Z důvodu saturace na křivce chybí předpokládaný tvar oblouku.



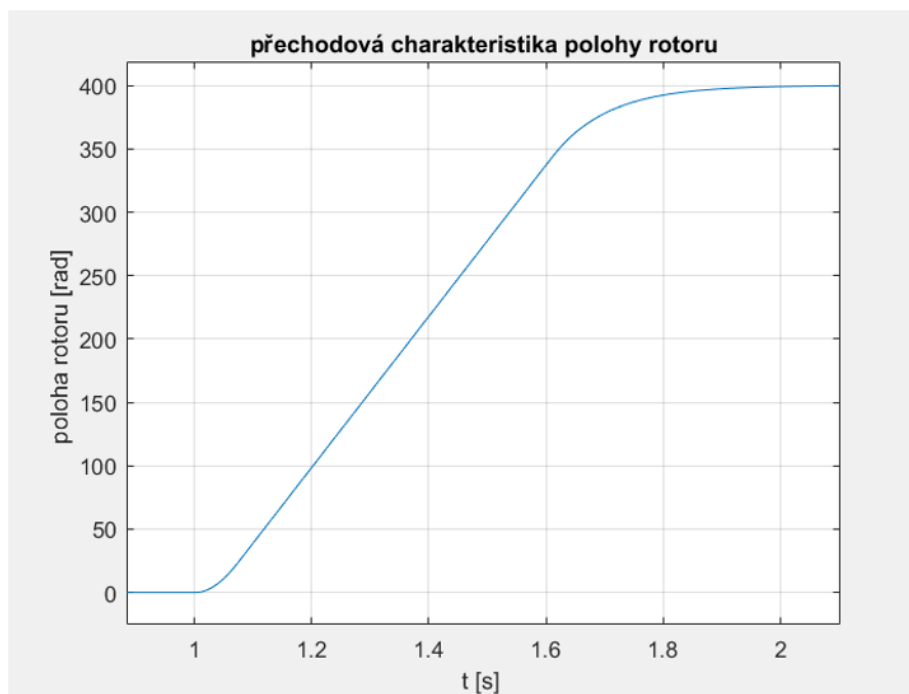
Graf: 2 rychlost matice v čase

Graf zrychlení matice je spíše informativního charakteru a vyplývá z něj, že maximálního zrychlení bylo dosaženo v čase 0.05 od spuštění regulace.



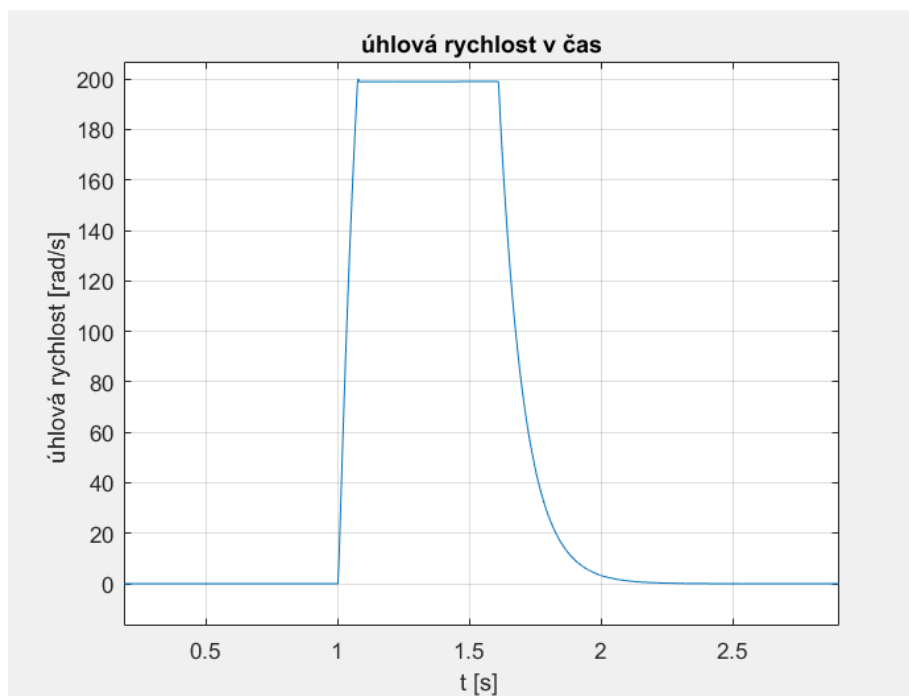
Graf: 3 zrychlení matice v čase

Přechodová charakteristika polohy rotoru téměř kopíruje tvarem charakteristiku polohu matice. Opět lze vidět, že doba regulace byla okolo 0.8 vteřiny a to bez překmitů. Od 1.05 vteřiny do 1.65 vteřiny dosáhl rotor maximální hodnoty saturace rychlosti, proto je charakteristika v tomto úseku lineární.



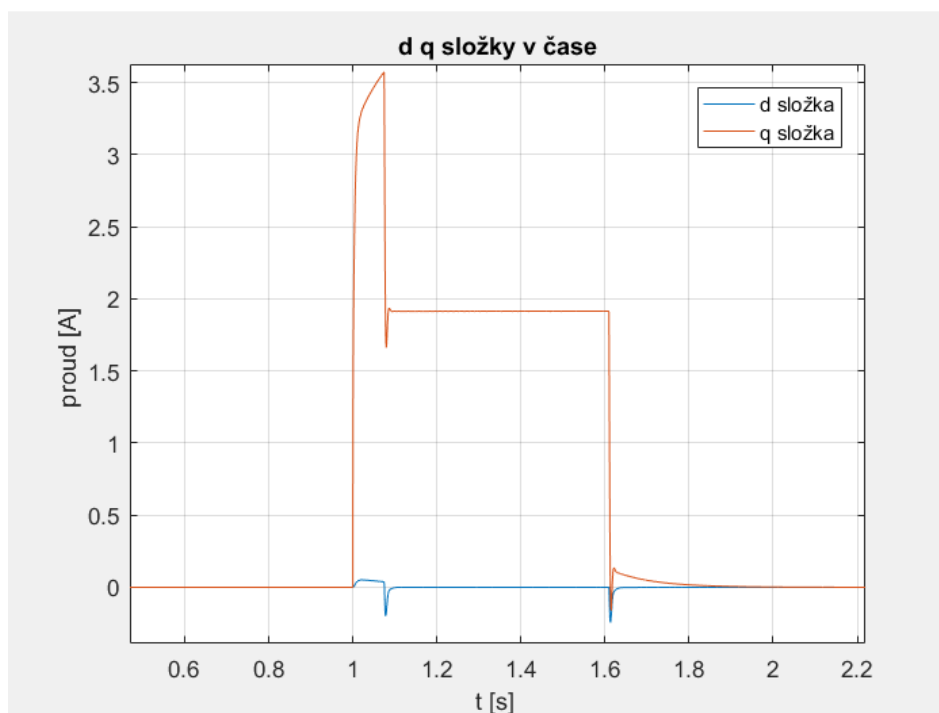
Graf: 4 přechodová charakteristika rychlosti rotoru

Úhlová rychlost rotoru opět téměř kopíruje rychlost matice. Lze vidět, že v čase od 1.09 vteřiny do 1.6 vteřiny bylo dosaženo maximální hodnoty saturace 200 rad/s.



Graf: 5 úhlová rychlost rotoru v čase

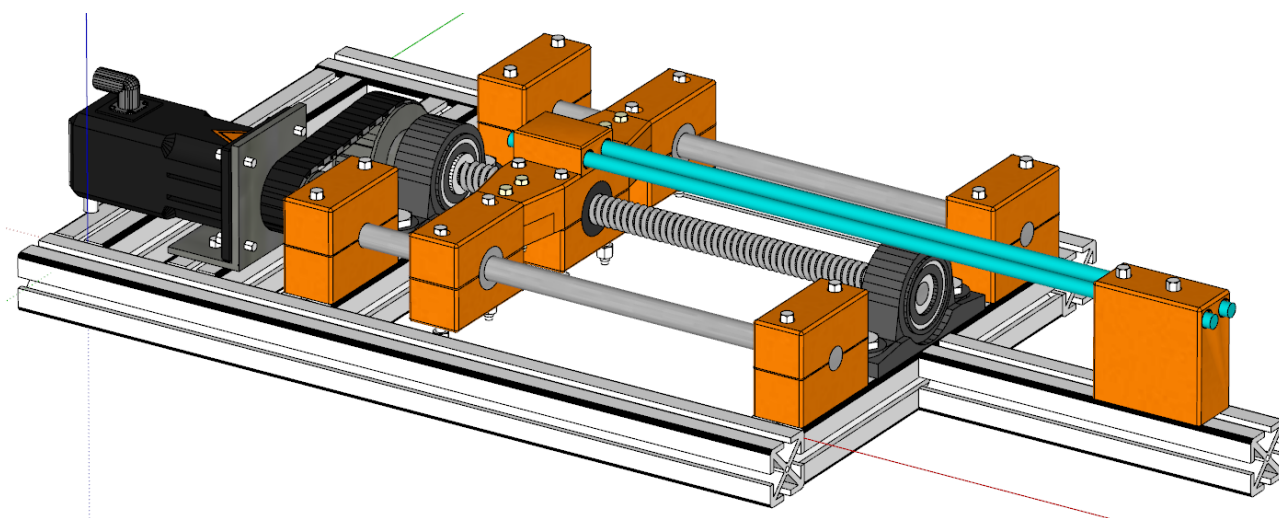
Složky proudu dq nedosáhly hodnoty saturace 4 Ampéry. Q složka je řízena regulátorem rychlosti a d složka je řízena na nulu. V čase 1 vteřina až 1.1 vteřiny jsou hodnoty q složky vysoké, z toho důvodu, že se rotor dostává do maximálních otáček. Po dosažení hodnoty saturace rychlosti se napětí q složky ustaluje na hodnotě 1.8 A, a poté klesá.



Graf: 6 hodnoty dq složek v čase

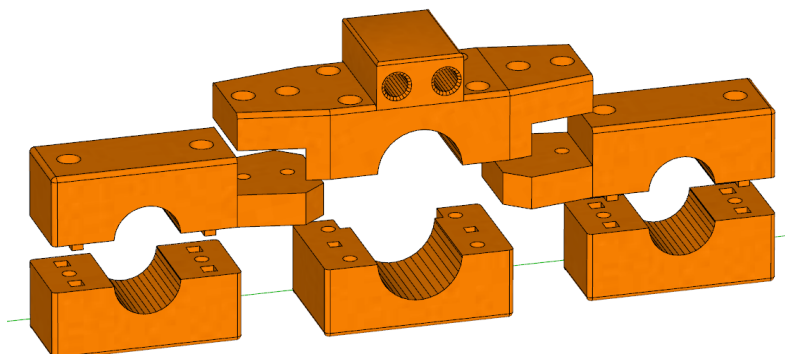
5. REALIZACE AKTUÁTORU

Pro ověření funkčnosti a přesnosti modelu sestaveného v Simulinku je třeba sestavit reálný aktuátor či soustavu, která přibližně aproximuje jeho chování. Než můžeme přistoupit k nákupu součástek ke stavbě je třeba vymodelovat fyzickou podobu aktuátoru. K modelování jsem využil SketchUp 2020 PRO. Do základní verze bylo třeba stáhnout knihovny FredoTool, RoundCorners a STL pro usnadnění modelování a možnosti exportu modelu do 3D tiskárny.

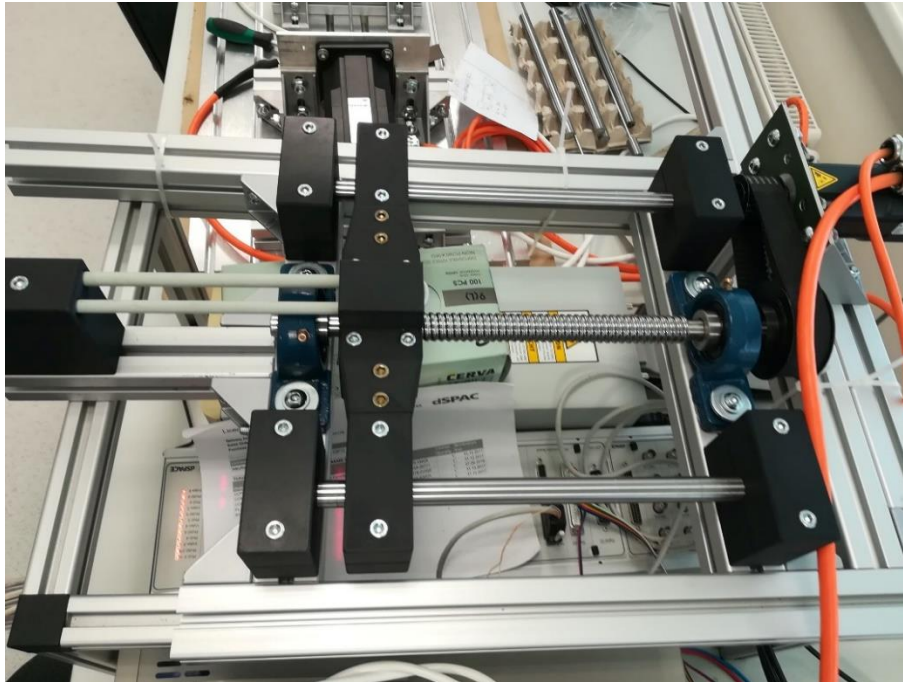


Obrázek 19: fyzický model sestrojeného EMA

Systém se skládá z motoru s enkodérem, čela motoru, pryžového řemene, řemenic 2x, zátěže v podobě gumy, lineární ložiska 2x, axiální ložiska 2x, kuličkový šroub, matice, vodící tyče, hliníkové profily a spojovací materiál. Oranžové součástky byly tisknuty na 3D tiskárně Prusa3i. Maximální tisknutelná plocha nebyla dostatečně velká pro tisk centrální části. Bylo třeba tuto část rozložit na menší „skládačku“.



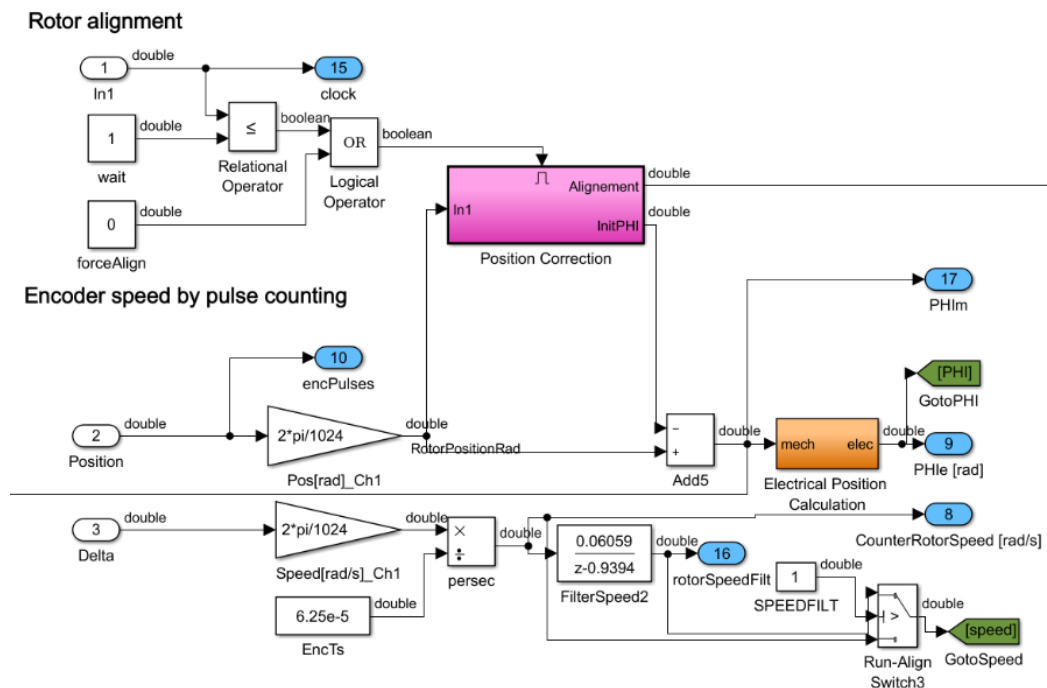
Obrázek 20: model 3D tisknuté centrální části



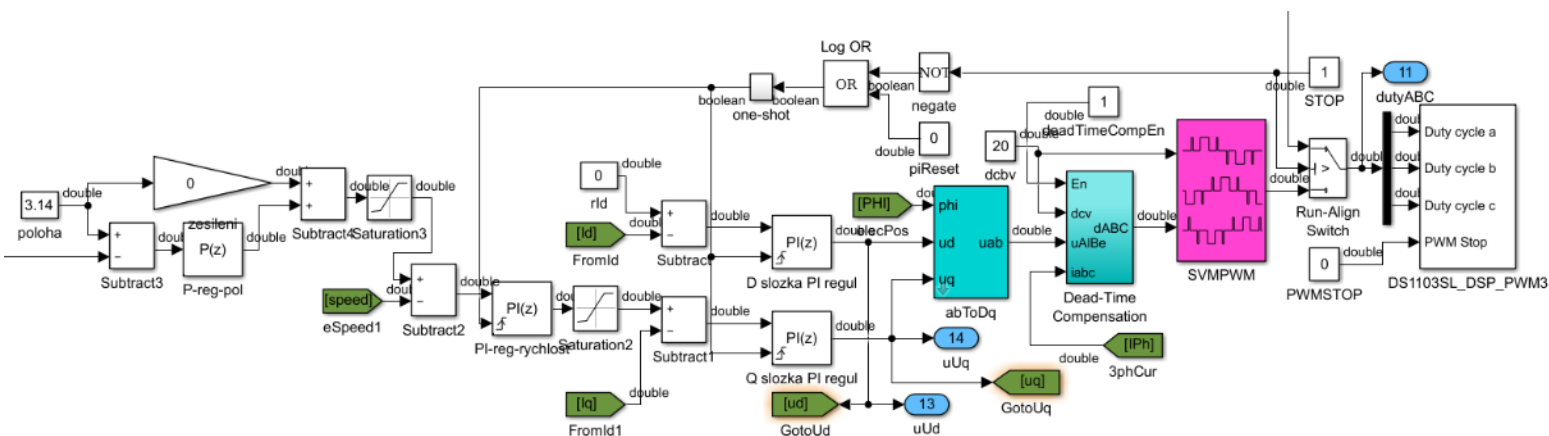
Obrázek 21: sestavený systém simulující chování EMA

5.1. Řízení za pomoci ControlDesku a dSPACE

Ověření vlastností probíhalo v Simulinku na modelu poskytnutém VUT. Tento model byl podrobnější a obsahoval i zarovnávací část (alignment), která spustila určitou hodnotu na fázích, tak aby byl rotor zarovnán s fází A. Po zarovnání byla enkodéru přidělena nulová pozice a bylo možné čítat pulzy.

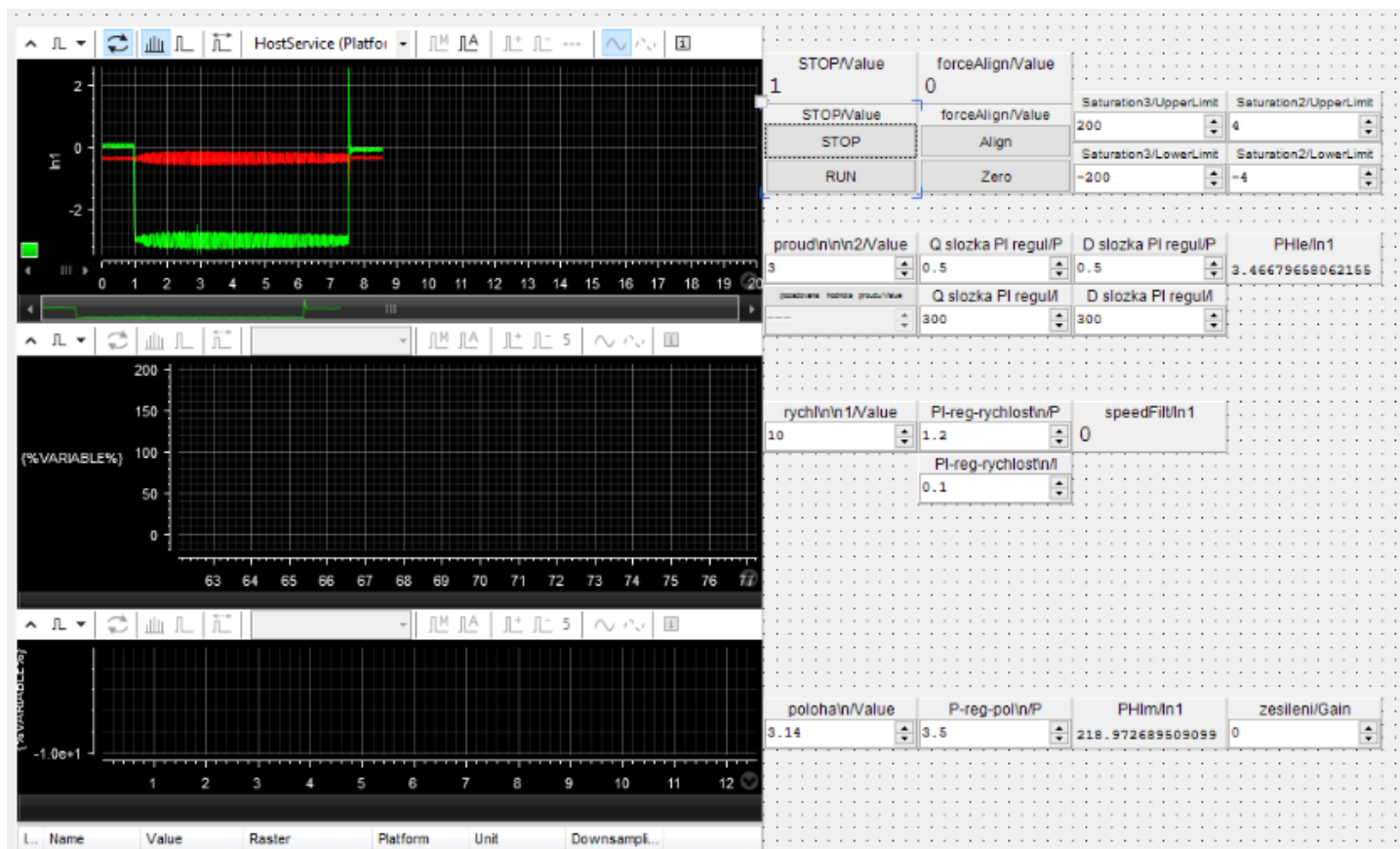


Obrázek 22: model VUT alignment



Obrázek 23: model VUT regulační schéma

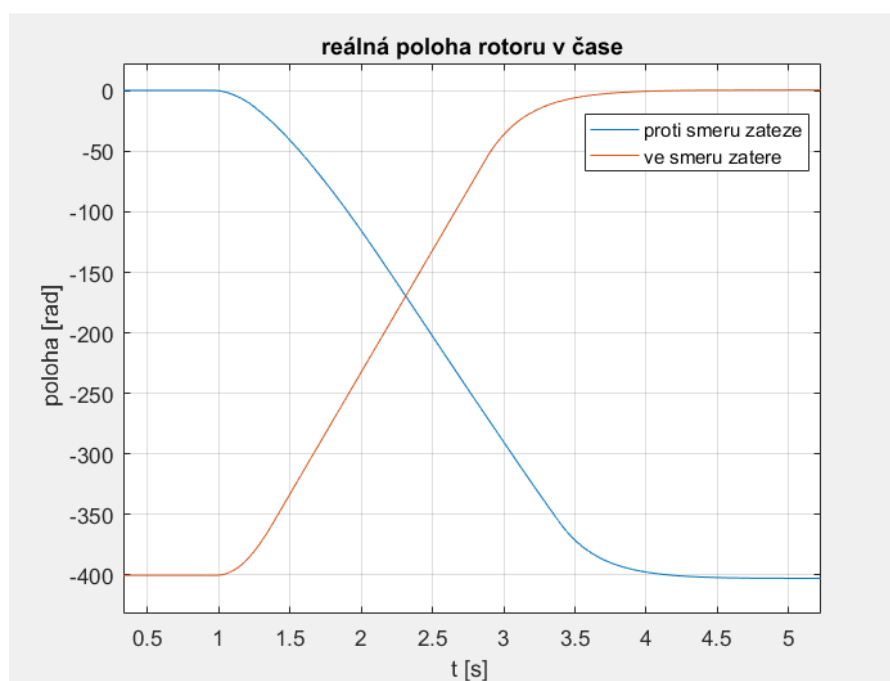
Ze Simulinku bylo třeba nahrát model do programu ControlDesk. ControlDesk je vývojové grafické prostředí pro kontrolu a návrh řídicích systémů především v automobilovém a leteckém průmyslu. ControlDesk je kompatibilní se Simulinkem a dovoluje automatické generování kódu z jednoho programovatelného prostředí do druhého díky tomu, že oba programy pracují na bázi C. Simulink generuje softwarové signály. Parametry těchto signálů lze poté v reálném čase měnit z prostředí ControlDesku. Tedy je možné měnit například parametry saturace či koeficienty regulátorů, parametry motoru a jiné. Díky možnosti zásahu přímo při experimentálním ověřování vlastností systému se problematika testování z hlediska časové náročnosti snižuje. Taktéž je podporováno grafické vyobrazení dat a zpracování dat jako je měření časových úseků, maximálních hodnot, průměrných hodnot a další. Možné je export dat zpět do Matlabu či excelu. ControlDesk spolupracuje s hardwarovou jednotkou dSpace, která je vyvinutá přímo za účelem testování řídicích aplikací. V případě této práce šlo o jednotkový systém DS1103 s procesorem PowerPC a sadou periférií na jedné desce. Tuto desku je možné umístit přímo do PC. Jednotka DS1103 zajišťovala elektronickou kontrolu nad motorem.



Obrázek 24: vývojové prostředí ControlDesk

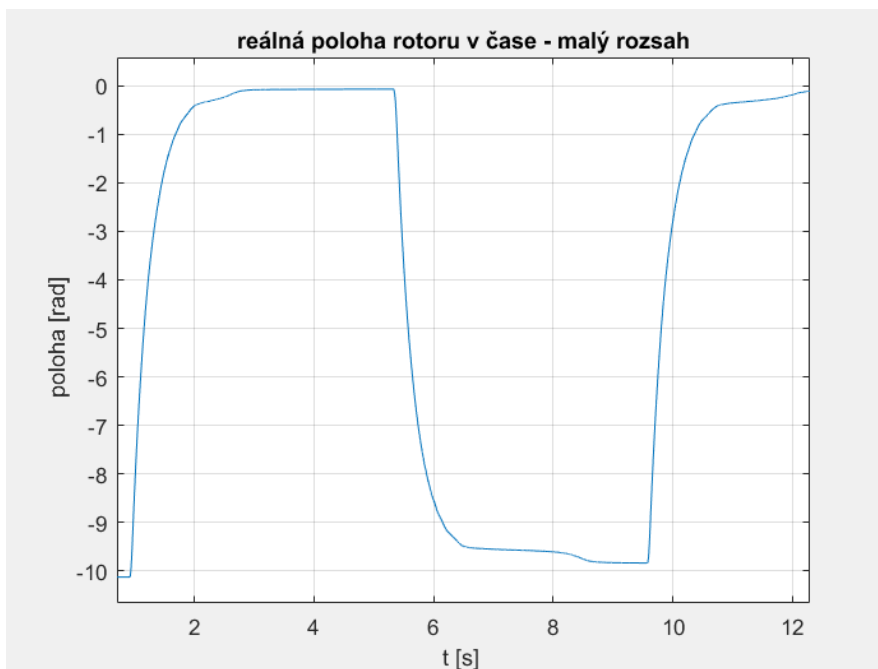
5.2. Data naměřená na reálném modelu aktuátoru

Následující graf zachycuje přechodovou charakteristiku reálné polohy rotoru v čase. Modrou je vyznačena poloha rotoru, který působí proti směru zátěže a červenou ve směru zátěže tedy zátěž pomáhá urychlit regulační děj. Lze říct, že regulace proběhla v obou směrech do 3 vteřin. Protnutí křivek nastalo v hodnotě -165 radiánů. Pokud by byla zátěž odstraněna protnutí by nastalo v hodnotě -200 radiánů. V době dosažení -200 radiánů je regulace proti směru zátěže ve skluzu o 0.65 vteřiny. Od začátku regulace v čase 1 vteřina až téměř po dosažení požadované hodnoty je nárůst polohy prakticky lineární. Toto chování zapříčiňuje saturace rychlosti rotoru. Proporciální regulátor byl nastaven tak aby byla přechodová charakteristika spíše tlumená.



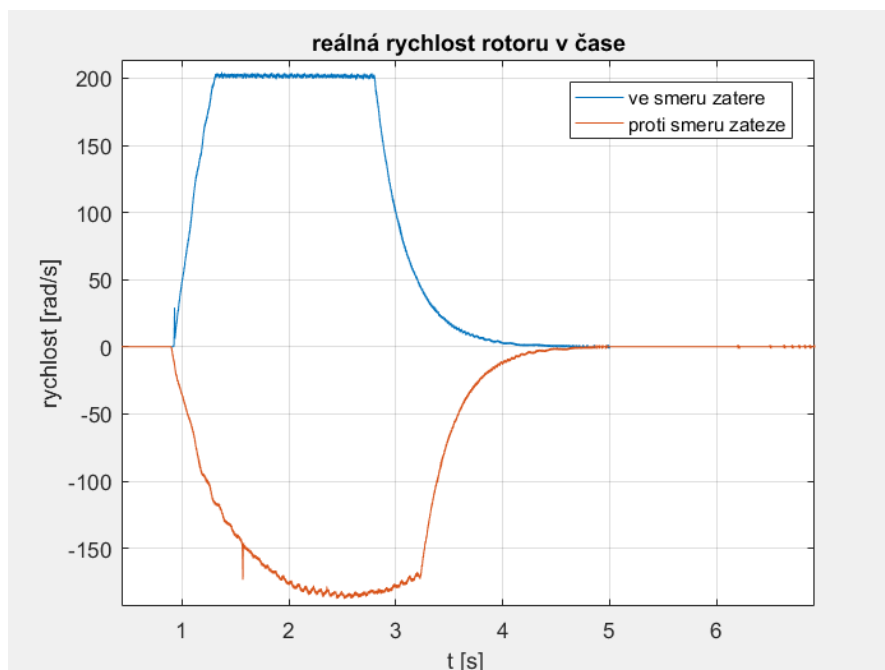
Graf: 7 přechodová charakteristika polohy rotoru

Regulátory byly nastaveny pro vyšší rozsahy, kde je přechodová charakteristika plynulá. Při použití nižšího rozsahu lze vidět, jak proporciální regulátor musí dorovnat polohu rotoru vždy když se dostane téměř do požadované polohy. Tento „schod“ lze odstranit nastavením silnějšího zesílení regulátoru polohy. Další možnost by pak bylo použít agresivnější nastavení I složky u regulátoru rychlosti. Obě tyto opatření by však vedly k nestabilitě na vyšším rozsahu. Pro odstranění nestability by poté bylo třeba zavést nižší saturaci otáček a proudu což by ale zpomalilo přechodový děj.



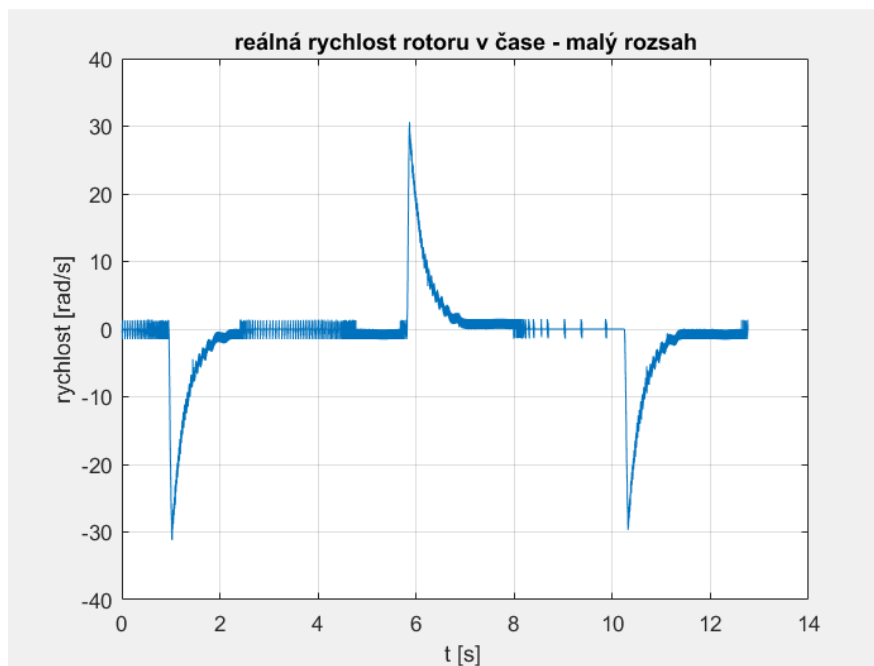
Graf: 8 přechodová charakteristika polohy rotoru na malém rozsahu

Přechodové charakteristiky rychlosti se na rozdíl od přechodových charakteristik polohy se již značně liší vzhledem ke směru zátěže. Při zahájení regulace ve směru zátěže nastává okamžitý překmit, kdy je třeba stáhnout rychlost otáčení a poté ji regulátor drží na lineárním nárůstu. Na rozdíl od simulace není vidět překmit při dosažení saturace z toho důvodu, že je utopen v šumu. Proti směru zátěže je s každou otočkou zátěž vyšší a proto zde regulátor nedosáhne ani saturační hodnoty -200 rad/s a stoupání je spíše pozvolné. V čase nad 6 vteřin po ustálení jsou stále vidět slabé zásahy regulátoru kdy má zátěž tendenci pootočit matici zpět.



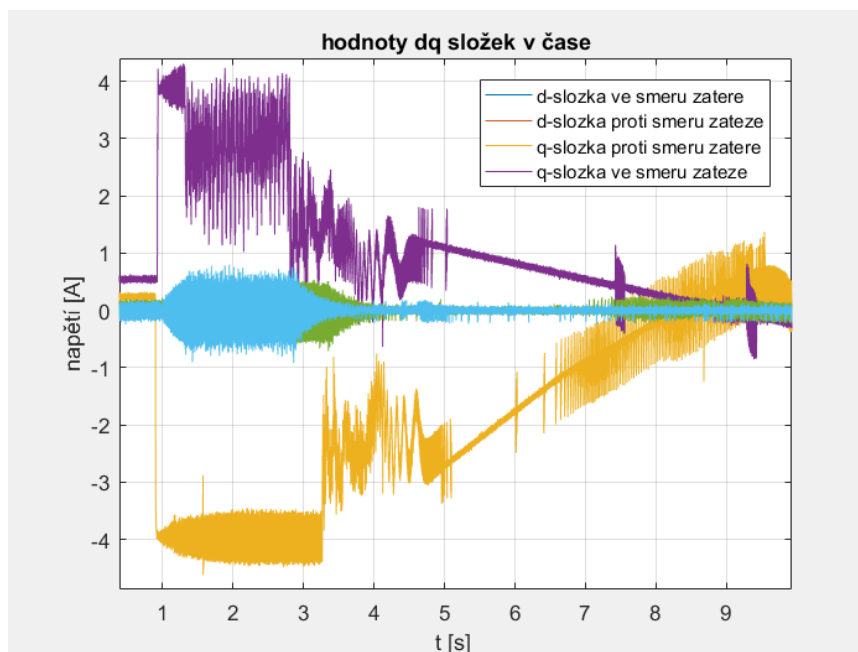
Graf: 9 reálná rychlost rotoru v čase

I když je regulátor rychlosti nastaven pro vyšší rozsahy tak jeho chování je paradoxně lepší pro nižší rozsahy kde působení proti zátěži je velice podobné jako po směru zátěže.



Graf: 10 reálná rychlost rotoru v čase na malém rozsahu

D složka je řízena do nuly a q složka je řízena výstupem z regulátoru rychlosti. Žlutá q složka spolu se zelenou d složkou působí proti zátěži a lze vidět, že po začátku děje regulace dosahují saturačních hodnot 4 ampéry a celková doba regulace je o něco delší. Požadovaných hodnot regulátor dosahuje v řádech tisíce vteřiny.



Graf: 11 hodnoty dq složek v čase

6. ZÁVĚR

1) Cílem této práce bylo sestavit model elektromechanického aktuátoru tak, aby co nejvěrněji napodoboval chování reálného aktuátoru.

2) Byla provedena rešerše, která popisuje základní typy aktuátorů. Dále je zde shrnuto využití jednotlivých typů aktuátorů v reálných aplikacích, včetně výhod a nevýhod. Elektromechanický aktuátor je popsán po jednotlivých součástkách, kde je největší pozornost věnována bezkartáčovým stejnosměrným motorům.

3) Práce obsahuje soupis rovnic, potřebných k aproximaci chování bezkartáčového motoru. Pro možnost celkové simulace aktuátoru, je zde uveden i matematický model zátěže. Tyto rovnice jsou aplikovány v prostředí Simulink jak můžete vidět na obrázku 16 až obrázku 18.

4) Pro uskutečnění simulací bylo třeba uvést model v Simulinku do provozu za pomoci regulačních struktur. Zvolil jsem rozvětvenou strukturu servomechanismu. Návrh struktury jednotlivých regulátorů probíhal v závislosti na tvaru přechodových charakteristik. Experimentálně bylo zjištěno, že použití I složky u všech regulátorů (proudu, rychlosti, polohy) způsobuje problémy se stabilitou z důvodu vyššího počtu astatismů. Použití D složek dávalo u matematického modelu relativně hezké výsledky z pohledu času a překmitu přechodové charakteristiky. Konečná volba jednotlivých regulátorů je PI pro proud, PI pro rychlost a P pro polohu. Výsledky simulace regulace jsou uvedeny v grafu 1 až grafu 6. Nastavení koeficientů jednotlivých složek pro regulátory bylo provedeno jako kompromis mezi celkovou dobou regulace, rozsahem pohybu matice, rychlostí náběhu křivky a překmitem přechodových charakteristik. Nejlepší čas pro regulaci polohy je 0.8 vteřiny.

5) Před sestrojením aktuátoru bylo nutné vymodelovat jeho fyzickou podobu pro optimalizaci nákladů, úsporu času, možnost 3D tisku součástek a samotnou možnost vizualizace projektu. Fyzický model je na obrázku 19 a jeho realizace na obrázku 21. Sestavený aktuátor byl připojen k jednotce DS-1103, která zajišťovala elektronickou kontrolu. Komunikace s jednotkou probíhala v prostředí programu ControlDesk. Díky kompatibilitě programu ControlDesk a Simulink, bylo možné vygenerovat model ze Simulinku do prostředí programu ControlDesk. Poté z ControlDesku bylo možné v reálném čase měnit jednotlivé parametry modelu. Při experimentálním ověřování platnosti jednotlivých koeficientů, které jsem získal ze simulace, bylo zjištěno, že použití D složky je nevhodné z důvodu zesílení šumu.

Po následné optimalizaci regulátorů bylo dosaženo funkčnosti modelu elektromechanického aktuátoru. Aktuátor byl otestován i pro zátěž ve formě gumové pružiny, která měla připodobňovat aerodynamické jevy působící na klapku letounu během letu. Výsledky testování jsou shrnuty v grafu 7 až grafu 11. Ve směru zátěže měla přechodová charakteristika polohy časově rychlejší nástup, avšak celková doba regulace byla prakticky stejná jako proti směru zátěže, a to do 3 vteřin od počátku regulace.

LITERATURA

- [1] *Šablona pro BP/DP a prezentace v2.63* [online]. Brno: FEKT VUT, 2017 [cit. 2017-03-06]. Dostupné z: <http://latex.feec.vutbr.cz/sablona/>
- [2] SIZING OF ACTUATORS FOR FLIGHT CONTROL SYSTEMS AND FLAPS INTEGRATION IN RAPID [online]. <https://www.diva-portal.org/>, [2015] [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:847029/FULLTEXT01.pdf>
- [3] JETELA, Václav. LETECKÉ AKTUÁTORY. ČR, 2014. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Ing. KAROL BENCALÍK.
- [4] PAVEL, Novák. LETECKÉ AKTUÁTORY: Návrh řídicího algoritmu pro stabilizaci letadla. ČR, 2013. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. Vedoucí práce Doc. ing. Jiří Krejsa Ph.D.
- [5] ROSKAM, Jan. Airplane flight dynamics and automatic flight controls. DARcorporation, 1998.
- [6] Modelování BLDC motoru [online]. ČR: Ing. Vít Hlinovský, CSc., [2015] [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://moodle.fel.cvut.cz/pluginfile.php/67401/mod_resource/content/1/12020_20BLDC20motor20simulace20matematick%C3%BD20model.pdf
- [7] KREJČÍ, Ondřej. ŘÍDICÍ JEDNOTKA PRO BLDC MOTOR. Brno, 2014. DIPLOMOVÁ PRÁCE. VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ.
- [8] ntitled-DSpace at University of West Bohemia [online]. ČR: Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni, 2017 [cit. 2020-01-04]. Dostupné z: https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/27248/1/Bakalarska_prace_Tomas_Blohmman_2017.pdf
- [9] řízení otáček BLDC motorů pomocí kitu Arduino. Praha, 2017. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. České vysoké učení technické v Praze.
- [10] BLAHA, Petr. Řízení a regulace 1: Základy regulace lineárních systémů - spojité a diskrétní. Brno, [2018]. Skripta. VUT - FEKT.
- [11] NEBORÁK, Ivo. *MODELOVÁNÍ A SIMULACE ELEKTRICKÝCH REGULOVANÝCH POHONŮ*. Ostrava, 2002. Skripta. Bánská univerzita